

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN DETECTOR DE RAYOS X Y RAYOS GAMMA
PARA APLICACIONES DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Carlos Hernán Salcedo Soto

ASESOR: Ing. Willy Eduardo Carrera Soria
Ing. Daniel Merino Ponce

Lima, Agosto 2013

RESUMEN

La radiación ionizante se encuentra en nuestro mundo de forma natural y es una herramienta tanto beneficiosa como dañina para el ser humano. El objetivo final de esta tesis es evadir los efectos dañinos, en específico, de la radiación X y gamma.

Durante este asunto de estudio se muestra el proceso detallado del diseño de un equipo de detección de rayos X y rayos gamma utilizando como pieza principal un diodo PIN de silicio modelo S3590-08, del fabricante Hamamatsu Photonics, capaz de sensar la intensidad de los rayos gamma y los rayos X a distintas energías.

El equipo es capaz de procesar los datos gracias a un microcontrolador Atmega8 de la compañía Atmel, y mostrar al usuario la dosis de radiación a la que está expuesto en tiempo real a través de una pantalla de cristal líquido. También le advierte al operario si ha superado un valor seguro a través de mensajes y de dos alarmas, una visual y la otra sonora.

Todo el diseño es validado en base a simulaciones de software que emulan el comportamiento, de forma aproximada, de la electrónica utilizada en la tesis. Además, se añade un protocolo de pruebas frente a radiación X para una futura etapa de implementación, calibración y uso final del equipo en el Laboratorio de Materiales de la especialidad de Ingeniería Mecánica.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1: TIPOS DE DETECTORES DE RAYOS X Y RAYOS GAMMA Y SUS APLICACIONES.....	2
1.1 Estado del arte.....	2
CAPÍTULO 2: TEORÍA DE RAYOS X Y RAYOS GAMMA.....	12
2.1 Conceptualizaciones generales.....	12
2.2 Efectos de la radiación X y radiación gamma.....	15
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL DETECTOR DE RAYOS X Y RAYOS GAMMA....	17
3.1 Objetivos.....	17
3.1.1 Objetivo General.....	17
3.1.2 Objetivos Específicos.....	17
3.2 Diagrama de Bloques.....	17
3.2.1 Bloque de sensado.....	18
3.2.1.1 Sensor.....	18
3.2.1.2 Amplificador operacional.....	18
3.2.1.3 Circuito de sensado.....	19
3.2.2 Acondicionamiento de Señal.....	23
3.2.3 Circuito de Sincronización.....	24
3.2.4 Alarmas.....	24
3.2.4.1 Alarma Sonora.....	24
3.2.4.2 Alarma Visual.....	25
3.2.5 Pantalla.....	25
3.2.6 Microcontrolador.....	26
3.2.6.1 Diagrama de Tiempos.....	27
3.2.6.2 Diagrama de Flujo Principal.....	28
3.2.6.3 Diagrama de Flujo Interrupción Externa INT0.....	30
3.2.7 Alimentación.....	31
3.3 Diagrama Esquemático.....	36
3.4 Costos.....	37
CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	38
4.1 Simulación del circuito de sensado en PSpice.....	38
4.2 Simulación del software del Atmega8 en Proteus.....	39

4.2.1 Simulación de la interrupción externa.....

4.2.1.1 Cambio de Dosis.....

4.2.1.2 Prueba de Alarmas.....

4.3 Protocolo de Pruebas.....

CONCLUSIONES.....

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....

FUENTES.....

39

40

40

41

48

49

50





INTRODUCCIÓN

La radiación es ampliamente utilizada en el mundo por sus grandes ventajas, en nuestro caso particular, los rayos gamma y rayos X son utilizados por su gran poder de penetración sin causar daños a la materia, pero como muchas labores donde se involucra aplicación tecnológica tiene desventajas en seguridad; la radiación tiene la característica de no ser inocua para los organismos vivos, esto provoca tener medidas muy estrictas de protección y seguridad, especialmente en medicina y en los sectores industriales.

Uno de los instrumentos para medir radiación más utilizados en el mundo son los equipos de detección de rayos X y rayos gamma, los trabajadores no pueden estar expuestos a más de una dosis determinada de radiación por lo que se les asignan estos equipos. En nuestro país, la seguridad en el ámbito de radiación gamma y X también tiene bastante importancia; los laboratorios y hospitales adquieren equipos de esta naturaleza para protección. Sin embargo, como no se cuenta con empresas nacionales que desarrollen esta tecnología, existe en la necesidad de importar lo que resulta mucho más costoso al traer un detector de radiación de países en desarrollo.

El estudio de los diversos tipos de detectores de rayos gamma y rayos X tiene dos bases centrales: la investigación de las diferentes tecnologías actuales de detección de radiación gamma y el diseño del circuito de sensado apropiado. Si se importan algunos componentes (como el sensor) que se crean en países de primer mundo y se compran el resto de componentes electrónicos en el mercado local, se lograría disminuir la inversión de una futura implementación de un detector de rayos gamma y rayos X. De esta manera, se otorgarán posibles alternativas de investigación y generación de tecnología en radiación a futuro.

El objetivo del presente estudio es poder diseñar un sistema de detección de rayos X y rayos gamma que cumpla con los requisitos de una alarma personal para un trabajador, además de que muestre la cantidad de radiación que recibe en cada momento.

CAPÍTULO 1

TIPOS DE DETECTORES DE RAYOS X Y RAYOS GAMMA Y SUS APLICACIONES

1.1 Estado del arte

1.1.1 Presentación del asunto de estudio

Desde su descubrimiento, los rayos X y los rayos gamma están siendo empleados en diversas áreas gracias a su particularidad de atravesar desde tejido biológico hasta grandes partes de motores de avión [1]. Actualmente, tienen mucha aplicación en medicina, energía nuclear, laboratorios de investigación, radiografía clínica e industrial, agricultura y en otros sectores industriales.

Sin embargo, la radiación tiene propiedades dañinas tanto para el medio ambiente como para la salud del hombre, llegando a producir diferentes enfermedades o la muerte dependiendo de diversos factores como la cantidad de radiación a la que se expone, tiempo de exposición, distancia respecto a la fuente de rayos y la parte anatómica que atraviesan. Debido a esto, queda clara la necesidad de implementar medidas de protección, las cuales pueden variar dependiendo de la aplicación pero deben cumplir el objetivo de controlar adecuadamente los rayos X y rayos gamma, es decir emplearlos en los rangos apropiados, cumpliendo con los estándares de seguridad determinados.

Gracias al desarrollo tecnológico mundial, ahora contamos con equipos electrónicos que nos permiten dosificar la radiación requerida, detectando la cantidad a la cual uno está expuesto. Como un país en vías de desarrollo, el crear equipos propios de detección nos da una oportunidad importante para trabajar seguramente con la radiación cumpliendo las normas necesarias.

El equipo a desarrollar debe cumplir requerimientos como: dimensiones, portabilidad, rango apropiado a medir y alarma ante riesgo de sobreexposición. Estas características aplicadas en el sector de radiografía industrial debe cumplir con las normas de seguridad de los laboratorios y proveer una protección efectiva para evitar accidentes.

1.1.2. Estado de la investigación

En la investigación, se presentarán principalmente equipos de detección de rayos gamma y rayos X donde se apreciarán sus especificaciones técnicas, los estándares de seguridad que cumplen y también sus áreas de utilidad. Se tomará enfoque en las tecnologías de sensado utilizadas actualmente, además de casos sobre radiografía industrial donde el equipo será utilizado.

A) Dosímetros

El dosímetro es un detector de rayos gamma o rayos X que tiene la característica de calcular y registrar la dosis recibida, permitiendo un monitoreo constante de la radiación.

Aplicación:

En medicina, este equipo es muy útil ya que constantemente los profesionales de salud utilizan los rayos X para tratamiento o diagnóstico, según necesario; en este campo la radiación aplicada puede variar relevantemente dependiendo del caso clínico en particular, por tanto el dosímetro debe contar con diferentes rangos de medición, ya que incluso en ciertos casos pequeñas dosis pueden afectar de manera significativa, no solo al paciente sino al equipo clínico que lo tiene en tratamiento [2].

Modelo: Pen Dosimeter [3]

Fabricante

SE Internacional, Inc. Ver figura 1.1

Rangos de Exposición

- **PEN200:** 0 a 200mR
- **PEN500:** 0 a 500mR
- **PEN2:** 0 a 2R
- **PEN5:** 0 a 5R
- **PEN20:** 0 a 20R
- **PEN2mSv:** 0 a 2mSv.
- **PEN5mSv:** 0 a 5mSv

Precisión

$\pm 10\%$ (Cs-137 o Co-60).

Energía de radiación

20keV hasta 2MeV

Peso

Aprox. 19 gramos



Figura 1.1 PEN Dosimeter tomado de [3]

Dimensiones

- **PEN- 200, 500, 2mSv, 5mSv** (Largo: 11 cm Diámetro: 1.5 cm)
- **PEN- 5, 2, 20** (Largo: 11.5 cm, Diámetro: 1.5 cm)

Modelo: MC1K Handheld [4]

Fabricante

SE International, Inc. Ver figura 1.2

Sensor

Tubo GM de halógeno templado

Rango de Operación

Posición X1: 0 - 1 mR/hr o 0 - .01 mSv/hr

Posición X10: 1 - 10 mR/hr o 0 - .1 mSv/hr

Posición X100: 5 - 100 mR/hr o 0 - 1 mSv/hr

Posición: X1000: 50 - 1000 mR/hr o 0 - 10 mSv/hr

Interruptor de Rango

X1, X10, X100, X1000.

Precisión

Típicamente $\pm 15\%$ (Cs^{137})

Sensibilidad

- Detecta rayos gamma hasta 40KeV
- La respuesta es plana desde 40KeV
- Aproximadamente 4 CPM

Requerimientos de energía

Batería alcalina de 9V

Peso

217 g

Salida

Jack de audífono de 3.5mm

Talla

209 x 71 x 50 mm

Accesorios

Estuche, Software Observador, Pin USB opcional



Figura 1.2. MCK1 Tomado de [4]

B) Alarmas de radiación personales

Este tipo de detector censa la cantidad de radiación recibida y cuando está cerca de sobrepasar un nivel aceptable activa una alarma sonora y visual; cuyo funcionamiento debe poder ser chequeado por norma.

Aplicación:

En plantas industriales, se obtienen placas radiográficas para poder encontrar defectos en recipientes de metal, tuberías y fallas en soldaduras; en trabajos de campo como los mencionados es imprescindible seguir los métodos precisamente respetando los estándares adecuados [5].

Las dos alarmas mostradas a continuación cumplen con el requerimiento de la norma NRC 10 CFR 34.33 promovida por la U.S NRC (Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos) [6]

Modelo: ND-15 [7]**Fabricante**

NDS Products, Inc. Ver figura 1.3

Sensor

Tubo GM de halógeno templado, 80 a 2000 KeV +/- 20%

Alarma Sonora

Emite un chirrido que se intensifica al incrementarse la radiación

Doble rango con ajuste alto/bajo:

- Rango alto: 60 chirridos en un campo de 30mr/hr.
- Rango bajo: 60 chirridos en un campo de 1mr/hr

Alarma de 100db a 6 pulgadas

Requerimientos de Energía

Batería de 9V

Tamaño

2.5" x 4.25" x 1.25" sin incluir gancho de correa

Peso

241 gramos incluyendo batería



Figura 1.3 Alarma de radiación

Tomado de [7]

Modelo: RA-500LE [8]**Fabricante**

NDS Products, Inc. Ver figura 1.4

Sensor

Tubo GM de halógeno templado, 80 a 2000 KeV +/- 20

Alarma Sonora

La alarma se activa en dosis de 500mR/H o superiores

Alarma de 100dB a 6 pulgadas

Acciones de Protección

El sistema se reajusta ante un apagado accidental.

El sistema incluye una prueba de batería y alarma

Requerimientos de Energía

Batería de 9V

Calibración

Potenciómetro de 24 vueltas

Tamaño

2.5"x 4.25"x 1.25"

Peso

227 gramos aproximadamente incluyendo batería



Figura 1.4 Alarma de radiación

Tomado de [8]

C) Dosímetro/Alarma Personal

Este equipo es una combinación de los dos anteriores, es decir cumple ambas funciones. La particularidad de estos equipos es que son desarrollados para rastrear dosis tanto muy bajas como muy altas de radiación con la misma precisión que los anteriores, se emplean en sectores más complejos y sofisticados aunque también pueden usarse en los mismos; estos detectores incluyen programas para PC que permiten seguir registros de radiación y generar reportes de conformidad.

Aplicación:

En la industria química, muchos proyectos e investigaciones requieren alta radiación gamma, que mejora las propiedades térmicas y electroquímicas de las baterías de litio utilizadas en vehículos eléctricos [9].

El tratamiento de aguas residuales con rayos gamma desinfecta el agua al mismo tiempo que libera proteínas, polisacáridos y enzimas [10]. En ambos casos la dosis de radiación es variable y el monitoreo es importante como la necesidad de una alarma en el desarrollo de las investigaciones.

Modelo: RAD-60 [11]**Fabricante**

SE International, Inc. Ver figura 1.5

Sensor

Diodo de silicio de energía compensada

Funciones de los Botones

El panel frontal de botones tiene las siguientes funciones:

- Cambiar la prioridad de display (dosis/tasa de dosis)
- Interruptor de ENCENDIDO/APAGADO

- Sonido de ENCENDIDO/APAGADO
- Reseteo de dosis integrada
- Cambiar umbrales de alarmas
- Prueba de Batería

Rango de Medida

Dosis: 1 μSv - 9.99 Sv o 0.1 mrem - 999 rem

Respuesta de energía

Hp (10). 60 KeV - 3 MeV, +/- 25%, y hasta 6 MeV, +/- 35%

Tasa de dosis

5 $\mu\text{Sv/h}$ - 3 Sv/h o 0.5 mrem/h - 300 rem/h

Linealidad de la tasa de dosis

+/- 15% hasta 3 Sv/h (300 rem/h)

Calibración

+/-5% (Cs-137, 662 KeV a 2 mSv/h), Hp (10)

Alarma Sonora

Siete alarmas separadas, sonido típico de 85dB a 30 cm

- Dosis integrada
- Tasa de dosis
- Sobreflujo de dosis
- Sobreflujo de tasa de dosis a 3 Sv/h o 300 rem/h
- Batería baja
- Defecto

Umbrales de alarma

Botón de selección para seis valores prefijados por dosis integrada y tasa de dosis

Conexión

Comunicación vía infrarrojo a través del equipo

Requerimientos de energía

Una pila alcalina triple A, típicamente dura 1800 horas (modo dosis)

Rango de Temperatura

-20 - + 50° C operacional, humedad hasta 90% RH

Peso

80g (incluyendo batería)

Tamaño

78 x 67 x 22 mm



Figura 1.5. RAD 60

Tomado de [11]

Modelo: El Sentry [12]**Fabricante**

SE International, Inc. Ver figura 1.6

Sensor

Tubo GM no compensado

Interruptor de Funciones

Encendido, clicks audibles: ENCENDIDO/APAGADO, alerta audible y vibratoria, y solo alerta vibratoria

Rango de operación

Tasa de dosis: 0.1 - 15 R/hr

Dosis acumulada: .1 - 65 R

Linealidad de la dosis

+/- 15% hasta 15 R

Respuesta Energética

Hasta 30 KeV

Sensibilidad Gamma

1.5cps/mR/hr referenciado al Co-60

Alarma Sonora

Alarma de 90 dB a 1 pie

- Dosis acumulada
- Tasa de dosis

Umbrals de Alarma

Alarma de dosis a 500mR por defecto

Alamar de tasa de dosis a 50mR/hr

Los niveles de alarma y advertencia son seleccionados con el software opcional Sentry

Conectores

Conector audífono, conector de cabecera serial interno (el cable viene con el software opcional Sentry)

Requerimientos de Poder

Batería 9V. La vida de la batería típica es de 1500 horas

Rango de Temperatura

-20° - + 50°C (-4° - +122°F)

Peso

88 g

Tamaño

96.5 x 70 x 25.4 mm



Figura 1.6 Sentry tomado de [12]

TECNOLOGÍAS ACTUALES DE SENSADO

Los equipos mostrados anteriormente difieren principalmente en el sensor utilizado; es el sensor quien origina una señal de salida la cual varía dependiendo de la tecnología del mismo. En esta parte, se explicaran las tres tecnologías de sensores más usuales y cual se escogió para resolver este asunto de estudio.

A) Cámaras Ionizantes

Las cámaras ionizantes contienen gas dentro de ellas, el cual es ionizado parcialmente cuando la radiación lo atraviesa generando una corriente eléctrica a través del dispositivo. Los sensores más utilizados, y más antiguos, de esta tecnología son los tubos Geiger-Muller (GM) los cuales debido a su bajo costo y simplicidad de operación se mantienen vigentes. Ver figura 1.7

Los tubos GM contienen gas templado (Argón, Neón, entre otros) que una vez ionizado genera ionizaciones secundarias aprovechando la cámara por completo; sin embargo, para obtener este efecto se requiere un alto voltaje de operación (500-2000 V)

Además, existe el denominado tiempo muerto, periodo en el cual el gas vuelve a su estado inicial y durante éste no se puede volver a detectar radiación, dura aproximadamente 20 us.

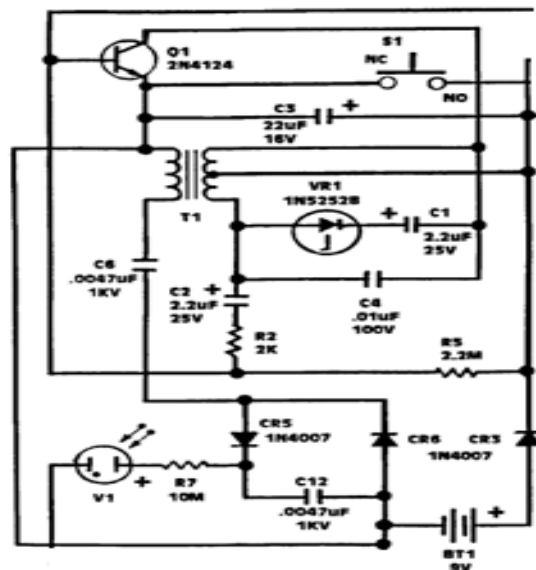


Figura 1.7. Circuito de detección, patentado por la empresa NDS Products, utilizando un tubo GM (V1). Tomado del Manual de Operador RA-500

B) Tubos Fotomultiplicadores

Tecnología ampliamente usada para de detección de radiación y espectroscopía, aprovechando el centello de luz producido en ciertos materiales.

Cuando la radiación atraviesa un material centellante, el cual puede ser orgánico o inorgánico, los átomos del material se excitan y desexcitan generando un centello de luz, es decir se transforma la energía cinética de los átomos en luz detectable por los tubos fotomultiplicadores (PM) que a su vez transforman la luz en pulsos de corriente eléctrica. Ver figura 1.8

Igual que los tubos GM, los tubos fotomultiplicadores requieren de un alto voltaje de operación. Además de la gran cantidad de pasos para obtener finalmente la corriente se necesita de mucha energía para poder formar el número adecuado de portadores que generen la luz detectable.



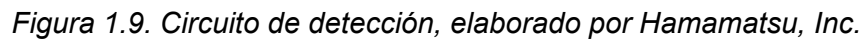
Figura 1.8. Tubo Fotomultiplicador R1527 del fabricante Hamamatsu, Inc.

Tomado de <http://www.hamamatsu.com/jp/en/R1527.html>

C) Detectores Semiconductores

Con un funcionamiento similar a las cámaras ionizantes, los materiales de estado sólido otorgan ventajas adicionales superando a las dos tecnologías previas. Cuando la radiación atraviesa el semiconductor se genera suficiente energía para que los electrones rompan el potencial de barrera generando un pulso de corriente. Ver figura 1.9

La energía para que los electrones salten a la banda de conducción es mucho menor que en los materiales centellantes, mejorando la resolución de energía. Además esta tecnología de estado sólido permite utilizar diodos (Silicio o Germanio) como sensores que no requieren de voltajes altos de operación.



Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

CAPÍTULO 2

TEORÍA DE RAYOS X Y RAYOS GAMMA

2.1 Conceptualizaciones generales

2.1.1 Radiografía Industrial

El asunto de estudio tiene aplicación específica para este sector, por lo que se revisarán algunos conceptos pertinentes al campo y un caso de importancia donde se muestra que se debe contar con medidas de protección entre las cuales está tener un dispositivo que detecte la radiación.

Definiciones

- Utilización de una fuente productora de radiación gamma o X de energía apropiada para obtener una imagen en película que permite obtener información sobre la macroestructura interna de una pieza o componente, advirtiéndolo sobre discontinuidades, cambios de sección, variaciones de densidad local o composición del material [13].
- Método de prueba no destructiva que permite la examinación interna de una estructura metálica exponiéndola a rayos X o rayos gamma. Los defectos internos pueden ser apreciados en una pantalla o filme radiográfico [14].

Los rayos X o gamma exponen en un filme radiográfico los defectos del área que atraviesan permitiendo buscar errores en tuberías, recipientes de metal y **soldaduras**. [5]

Soldadura

Es el proceso de juntar dos piezas metálicas para que la unión acompañada por una penetración interatómica apreciable tome lugar en la superficie original de la unión. Las uniones más o menos desaparecen al soldar y cristales integrales aparecen a través de ellas. La soldadura se lleva a cabo utilizando calor o presión o ambos con o sin metal añadido [15].

Una vez tomado el filme radiográfico, se corrige el defecto y se vuelve a tomar otro filme para otra revisión.

2.1.2 Radiación

Definición:

Emisión y propagación de energía a través del espacio o a través de material en forma de partículas u ondas [16]. La energía es medida en las unidades: eV

El tema de radiación es bastante amplio por lo que se definirá brevemente algunos términos relacionados a ella para acercarnos a los rayos X y los rayos gamma (γ)

Cuando la energía emitida ioniza partículas, ésta es llamada **radiación ionizante**, la cual tiene dos vertientes que difieren en su modo de interactuar con la materia.

Radiación ionizante directa

Partículas cargadas que tienen suficiente energía cinética para ionizar otras partículas en intervalos cortos de tiempo por medio de una colisión. Están incluidas: partículas alfa, beta, protones y electrones entre otros.

Radiación ionizante indirecta

Partículas sin carga que atraviesan el medio sin interacción con electrones hasta que por colisión liberan partículas ionizadas directas o inician una transformación nuclear. Están incluidas: rayos gamma, rayos X, neutrones y mesones neutros entre otros.

Como se observa en nuestro caso la radiación con la que se trabaja es ionizante indirecta, dentro del amplio campo de la radiación ionizante indirecta existen otros conceptos importantes que son necesarios conocer:

Dosis Absorbida

Cantidad que indica la energía impartida a la materia

Unidad tradicional: rad

Unidad SI: Gray (Gy)

Conversión: 1 gray = 100 rad [17]

Factor de calidad (QF)

Cantidad que relaciona la dosis absorbida con el daño producido por diferentes partículas. [17]

Rayos X/Rayos Gamma: $QF=1$

Dosis Equivalente

El daño producido por la dosis absorbida depende del tipo de partícula o energía emitida.

Unidad tradicional: rem

Unidad SI: sieverts (Sv) [17]

Conversiones:

- $rem = QF * rad$
- $Sv = QF * Gy$

Rayos Gamma ($R\gamma$)

Radiación electromagnética emitida por un núcleo radioactivo en forma de paquetes de energía, llamado fotones, usualmente acompañado de partículas beta del mismo núcleo [17]. Ver figura 2.1.

Energía electromagnética sin masa, longitud de onda corta, alta energía y con gran poder penetrante [5].

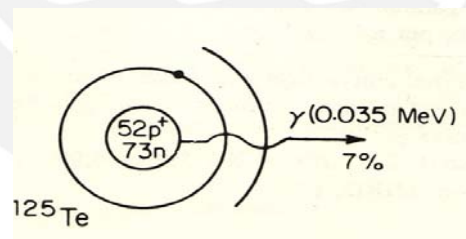


Figura 2.1 Rayos Gamma ($R\gamma$). Tomado de [17].

Rayos X (Rx)

Radiación electromagnética sin masa con longitud corta, alta energía y poder penetrante emitida por interacciones en los orbitales de los electrones [17].

Ver figura 2.2

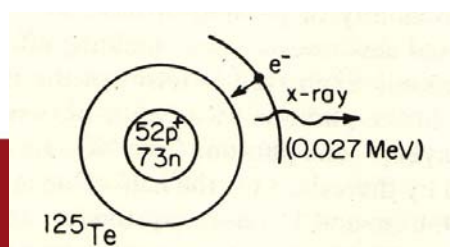


Figura 2.2. Rayos X (Rx) Tomado de [17]

Espectro Electromagnético

La diferencia en rangos de frecuencia y longitud de onda se puede observar en su espectro electromagnético. Los rayos gamma y rayos X tienen menor longitud de onda que otras ondas electromagnéticas. Ver figura 2.3

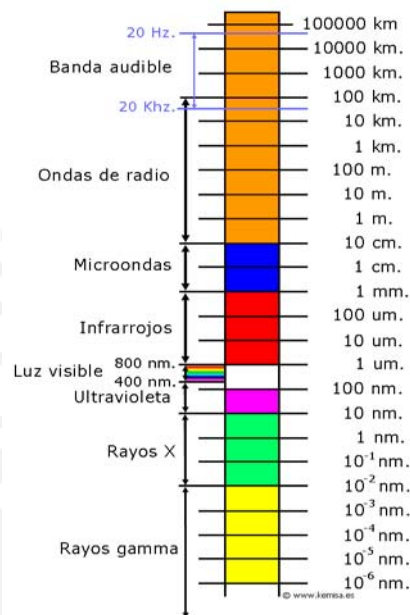


Figura 2.3 Espectro Electromagnético. Tomado de

http://www.kemisa.es/espectro_electromagnetico.php

Los rayos gamma y rayos X son el mismo tipo de radiación, interactúan de la misma manera con la materia y las únicas diferencias son: su forma de producirse y ligeras variaciones de longitud de onda.

2.2 Efectos de la radiación

En esta parte del fundamento teórico se describen brevemente los efectos

dañinos de los Rx y R γ .

2.2.1 Efectos Estocásticos

Efectos probabilísticos, es decir que puede o no presentarse. La exposición ante rayos X o gamma incrementa la probabilidad de cáncer o la aparición de efectos retardados a largo plazo. [5]

2.2.2 Efectos Determinísticos

Exposición donde a mayor dosis absorbida de rayos X o gamma mayor lesión, sea esta aguda o retardada, local o en todo el cuerpo. Los efectos determinísticos son mostrados en las siguientes tablas [5]

2.2.3 Límite de Radiación

El Laboratorio de Materiales de la PUCP realiza sus procedimientos de acuerdo a normativas internacionales. Además, regula sus límites de tasas de dosis de acuerdo a lo impuesto por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN)

Límite de Radiación. IPEN [18]:

El dosímetro utilizado en las pruebas de radiografía industrial debe tener un rango de lectura de 0 a 10 mSv/hora y activar una alarma cuando supere el rango.

Límite de Radiación. Laboratorio de Materiales PUCP [19]:

El límite de radiación para el personal ocupacional expuesto es:

$$\text{LÍMITE} = 20 \frac{\text{mSv}}{\text{AÑO}} \times \frac{1 \text{ AÑO}}{12 \text{ MESES}} \times \frac{1 \text{ MES}}{20 \text{ DÍAS}} \times \frac{1 \text{ DÍA}}{8 \text{ HORAS}} = 10.42 \frac{\text{uSv}}{\text{HORA}}$$

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL DETECTOR DE RAYOS X Y RAYOS GAMMA

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de detección de rayos gamma y rayos X que registre la cantidad de dosis equivalente para mostrarla al usuario que trabaja con la radiación en el campo de radiografía industrial.

3.1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar el sensor adecuado para obtener la radiación
- Diseñar un circuito que acondicione la señal de salida del sensor para que pueda ser procesada por un microcontrolador
- Elaborar un programa en microcontrolador que realice los cálculos de dosis, muestre el resultado en pantalla, active y verifique alarmas
- Diseñar un sistema de alarma (visual y sonora) que cumpla con las normativas certificadas de protección a la radiación
- Diseñar una fuente de alimentación para todo el equipo utilizando una batería pequeña (1.5VDC a 12VDC)

3.2 Diagrama de Bloques

Basándonos en el siguiente diagrama de bloques, mostrado en la figura 3.1, describiremos todos los elementos que conforman electrónicamente el equipo de detección de rayos X y rayos gamma.

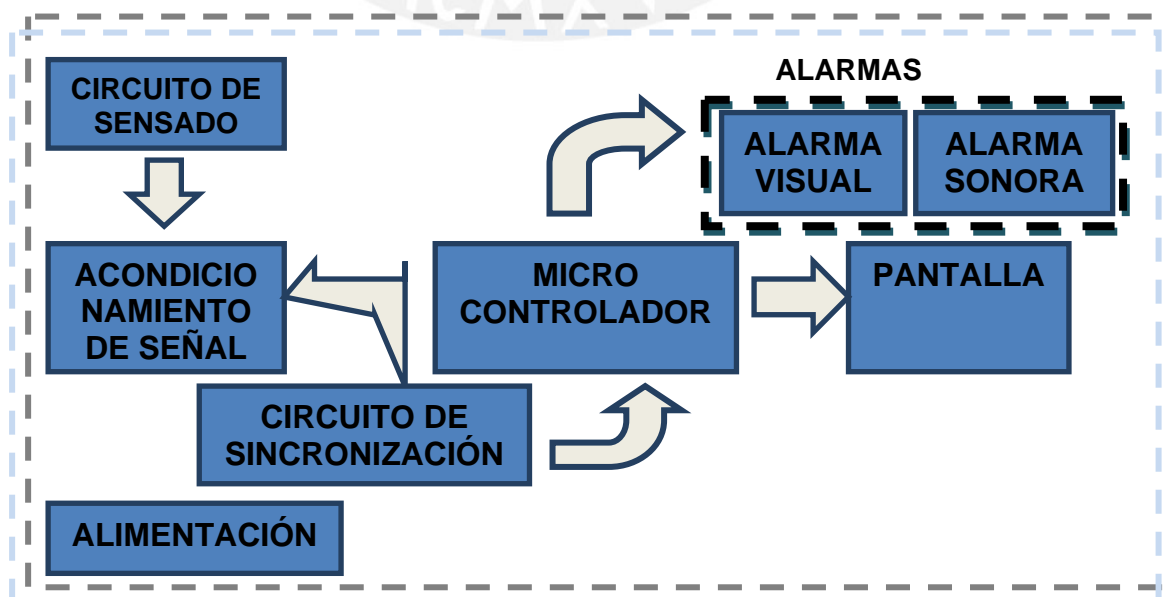


Figura 3.1. Diagrama de Bloques. Elaboración Propia

3.2.1 Bloque de Sensado

3.2.1.1 Sensor

A partir de lo descrito en el capítulo 2, se ha concluido el uso de un diodo de silicio PIN como sensor debido a los siguientes factores:

- Eficiencia: Su capacidad de detección es superior a las otras tecnologías.
- Simplicidad: Basta un par de etapas fáciles de implementar sin necesidad de altos voltajes.
- Respuesta: Tiene un alta velocidad de respuesta adicionalmente de una buena estabilidad en el espectro electromagnético de interés.

Tabla 3.1 Comparación de sensores de radiación.

Características	S3590-08	X100-THD	BPW34
Fabricante	Hamamatsu	First Sensor	Vishay Semiconductors
Área Activa	100 mm ²	100 mm ²	7.5 mm ²
Voltaje Reversa Máximo	100V	50V	60V
Corriente Oscura Máxima	6nA	10nA	30nA
Consumo de Potencia Máximo	100mW	500mW	215mW
Capacitancia Típica	40pF	90pF	25pF
Otros	El fabricante otorga un gran bagaje de información teórica y técnica para sus dispositivos	Cumple con la norma RoHS	Cumple con la norma RoHS

Elaboración: Propia

A partir de la comparación de la tabla 3.1 cualquier dispositivo podría permitir cumplir los objetivos del asunto de estudio; sin embargo es el diodo PIN S3590-08 el escogido gracias a que maneja menores valores de capacitancia y corriente oscura, además de contar con el soporte teórico del mismo fabricante.

3.2.1.2 Amplificador Operacional

Los operacionales seleccionados cumplen una función muy importante para poder procesar la señal. Como trabajamos con valores muy pequeños de

corriente y tiempos bastante cortos, necesitamos un operacional con una alta impedancia de entrada la cual es otorgada por los operacionales con entrada FET, alto slew rate y baja densidad espectral de ruido.

Tabla 3.2. Comparación de amplificadores operacionales.

Características	TL081	LF442	AD824
Alimentación	Dual.	Dual.	Única/Dual.
Oscilación de voltaje en la Salida	$V_O = \pm 10\text{ V}$	$V_O = \pm 10\text{ V}$	$V_{OH} = +4.98\text{ V}$ $V_{OL} = 0.015\text{ V}$
Corriente de Polarización	2 pA	2 pA	2 pA
CMRR	100 dB	90 dB	80 dB
Slew Rate	13V/us	1 V/us	2 V/us
Densidad de Ruido de Corriente	0.01 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.01 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.1 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ganancia de Ancho de Banda	4 MHz	1 MHz	2 MHz
Corriente de alimentación	1.8 mA	400 uA	560 uA
Extras	Disponible en el mercado local. El empaque presenta un solo operacional	Disponible en el mercado local. El empaque presenta dos operacionales	No disponible en el mercado local. El empaque presenta cuatro operacionales

Elaboración: Propia

De acuerdo a la Tabla 3.2, si bien el AD824 supera a los otros dos operacionales comparados en varias características, se prefirió el **LF442** debido a su bajo consumo de corriente y su disponibilidad en el mercado local.

3.2.1.3 Circuito de Sensado

Este circuito se basa en el uso de dispositivos semiconductores que permiten relacionar la intensidad de la radiación y obtener un voltaje proporcional.

Una vez escogido el diodo PIN, éste puede utilizarse de dos maneras (modo fotovoltaico y fotoconductor), en este asunto de estudio se usa el modo fotoconductor –se identifica por la inclusión de un voltaje en reversa en el diodo- para aprovechar mejor la respuesta en frecuencia y la linealidad del dispositivo.

Cuando la radiación atraviesa el diodo se genera un pulso de corriente muy débil, del orden máximo de los nanoamperios, con un ancho de pulso de 5 μ s y con un periodo de 5ms [20] como se muestra en la figura 3.2. La curva **31** muestra la forma de onda de la corriente cuando la radiación atraviesa el sensor sin ningún obstáculo; en cambio, la curva **32** nos muestra la forma cuando ha atravesado algún objeto. Se propone utilizar una cubierta de aluminio fundido para bloquear las ondas provenientes del espectro electromagnético visible.

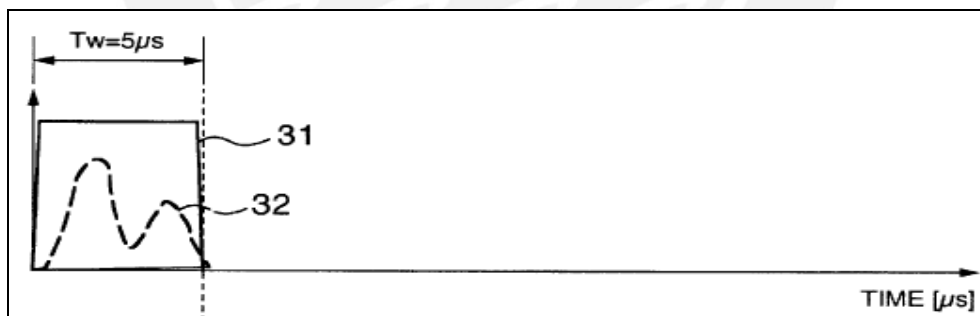


Figura 3.2. Corriente de salida del sensor [20]

La corriente que aparece en el diodo PIN será transformada en voltaje a través de un circuito integrador obteniendo así un voltaje proporcional al número incidente de fotones de rayos X o rayos gamma. Evidentemente, las curvas **33** y **34** mostradas en la figura 3.3 son las integraciones de las curvas **31** y **32**, de la figura anterior, respectivamente.

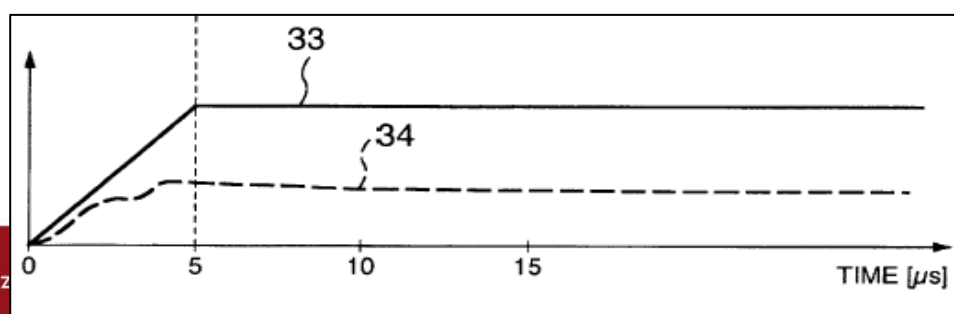


Figura 3.3. Voltaje de Salida del Integrador [20].

La figura 3.4 muestra el circuito de sensado del detector de R_x y R_y

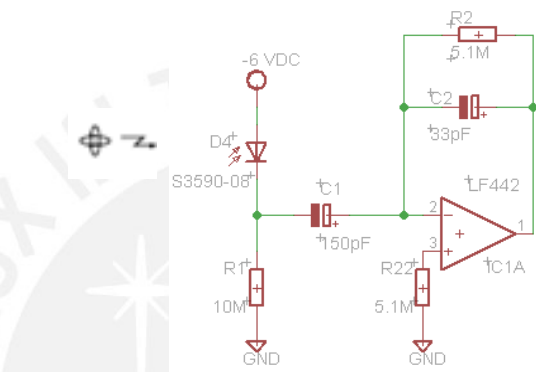


Figura 3.4. Circuito de Sensado

Ver el ANEXO N°1 para revisar con detalle los cálculos de los componentes. Una vez integrado el pulso de corriente, debemos asegurarnos que el condensador C2 se descargue antes de la llegada del siguiente pulso de radiación, esto se logra con la constante de tiempo $\tau = R_2 \times C_2$.

$$\tau = 5.1 \text{ M} \times 33 \text{ pF} = 168.3 \text{ us}$$

Como observamos gracias a la constante de tiempo, el condensador se descarga mucho antes de la llegada de un siguiente pulso de radiación.

Análisis de Ruido

El utilizar elementos de estado sólido es una fuente natural de ruido electrónico, aún más lo es el utilizar diodos con la capacidad de sensor luz como el S3590-08. El diodo PIN, la etapa de integración y el voltaje característico del modo fotoconductor se convierten en las fuentes principales

de ruido, el cual es de particular interés en este asunto de estudio debido a los

valores tan bajos de corriente que generan los R_x y R_y .

Utilizando las curvas de hoja de datos del sensor obtenemos los dos siguientes datos necesarios para el análisis [21]:

- $I_D = 10\text{pA}$
- $C_J = 100\text{pF}$
- $R_{SH} = \frac{10\text{mV}}{10\text{pA}} = 10\text{ G}\Omega$

Ruido Térmico (Johnson):

Este ruido es generado por la agitación de electrones en la resistencia shunt mostrada en la figura del circuito equivalente del diodo.

$$i_f = \sqrt{\frac{4kTB}{R_{SH}}}$$

$$i_f = \sqrt{\frac{4 \times 1.33 \times 10^{-23} \times 300 \times 839.56}{10 \times 10^9}}$$

$$i_f = 36.60 \times 10^{-15} \text{ A}$$

Ruido de Disparo:

Generado por la circulación de corriente a través del diodo PIN cuando atraviesa el potencial de barrera.

$$i_{sD} = \sqrt{2qI_D B}$$

$$i_{sD} = \sqrt{2 \times 1.602 \times 10^{-19} \times 10 \times 10^{-12} \times 839.56}$$

$$i_{sD} = 51.8647 \times 10^{-15} \text{ A}$$

$$i_{sL} = \sqrt{2qI_L B}$$

$$i_{sL} = \sqrt{2 \times 1.602 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-12} \times 839.56}$$

$$i_{sL} = 16.401 \times 10^{-15} \text{ A}$$

Ruido Blanco Total:

$$i_T = \sqrt{i_{sL}^2 + i_{sD}^2 + i_f^2}$$

$$i_T = 65.56 \times 10^{-15} \text{ A}$$

Ruido Flicker:

El conocido ruido rosa generado por la aparición del voltaje negativo para alimentar el diodo. Este es mucho más perjudicial cuando se trabaja con bajas frecuencias, porque su densidad espectral de potencia aumenta como se muestra en la figura 3.5.

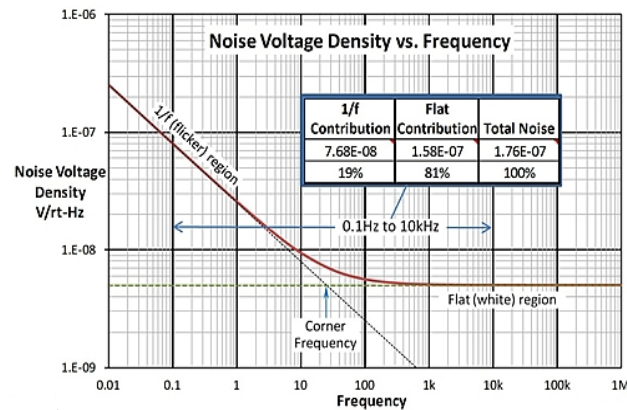


Figura 3.5. Ejemplo de Ruido Flicker.

Tomado de <http://www.edn.com/electronics-blogs/the-signal/4408242/1-f-Noise-the-flickering-candle->

3.2.2 Acondicionamiento de la señal

En esta etapa se amplifica la señal de voltaje proveniente de la radiación para que pueda ser recibida por el conversor análogo digital del microcontrolador.

Debido a que los valores de corriente son muy bajos, se requiere de una etapa de amplificación con una ganancia cercana al millón.

Las pruebas de radiografía industrial se trabajan habitualmente en el Laboratorio de Materiales, por lo tanto los rangos de corriente para esta aplicación y este tipo de ambiente varían entre 10^{-12} y 10^{-8} amperios [22]. Para tener una noción más teórica, la empresa Detection Technology emplea la

siguiente formula: $I_L[A] = \frac{N \times A \times r \times \bar{E} \times 1.6 \times 10^{-19}}{3.6}$ [22] como parte de un procedimiento teórico más extenso.

Sin embargo, este procedimiento no es válido en nuestro caso porque el Laboratorio de Materiales trabaja exclusivamente con Rx y los valores de esta corriente dependen de una variable conocida como Actividad, la cual es

propia de los Ry.

Por lo tanto consideramos las peores condiciones de corriente posibles de encontrar en el Laboratorio de Materiales:

- $I_{L1} = 10^{-11} A$
- $I_{L2} = 10^{-12} A$
- $f_{SEAL} = 10 kHz$

Reemplazando datos en la función de transferencia calculada en el Anexo 1, considerando solo la parte integrativa, obtenemos

$$V_O = I_L \times R_1 \times \frac{R_2 C_1 s}{(1 + s R_2 C_2)}$$

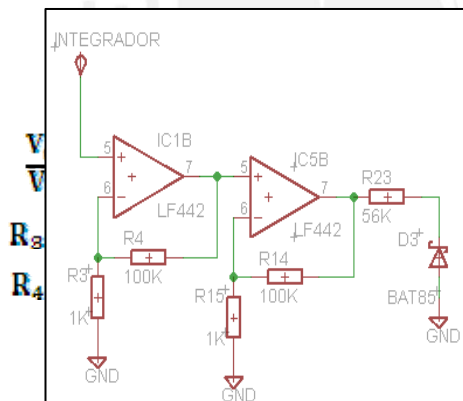
$$V_O = I_L \times R_1 \times \frac{2\pi \times 10 \times 10^5 \times 150 \times 10^{-12} \times 10 \times 10^6}{(1 + 2\pi \times 10 \times 10^5 \times 3.3 \times 10^{-12} \times 10 \times 10^6)}$$

$$V_O = I_L \times R_1 \times 30.6651$$

$$V_{O1} = (10^{-12} \times 10^6) \times 30.6651 \quad V_{O2} = (10^{-11} \times 10^6) \times 30.6651$$

$$V_{O1} = 30.6651 \mu V \quad V_{O2} = 305.6651 \mu V$$

Utilizando dos amplificadores no inversores en cascada, cada uno con una ganancia de 101 como se ve en la Figura 3.6, podemos obtener una señal adecuada para el conversor analogo digital del microcontrolador.



$$V_{S1} = 101 \times 101 \times V_{O1}$$

$$V_{S1} = 3.127 V$$

$$V_{S2} = 101 \times 101 \times V_{O2}$$

$$V_{S2} = 312.7 mV$$

Figura 3.6. Circuito de acondicionamiento de señal

3.2.3 Circuito de Sincronización

Una vez iniciada la detección el microcontrolador necesita una señal de aviso para poder leer el valor de voltaje correspondiente al número promedio de fotones.

Basta que aparezca una señal de 100mV en la salida de la amplificación para mandar una señal al microcontrolador y así este inicie la lectura de la radiación. Esto es logrado utilizando un comparador, como se ve en la figura 3.7, que envía una señal de 5 VDC una vez que la señal supera los 100mV.

Caso contrario se envía '0' gracias al diodo Schottky (el LF442 trabaja con alimentación dual $\pm 5V$)

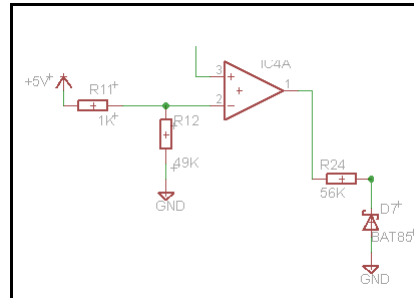


Figura 3.7. Circuito de Sincronización

3.2.4 Alarmas

Una vez sobrepasado el límite seguro de radiación, se deben activar dos alarmas: sonora y visual, las cuales utilizando salidas del microcontrolador activan sus respectivos circuitos.

3.2.4.1 Alarma Sonora

Se seleccionó un **buzzer** por su alta intensidad sonora (aprox. 76 dB a 30 cm) y su poco consumo de corriente (aprox. 5 mA) [23]. Gracias a estas características es posible conectarlo al microcontrolador como se muestra en la figura 3.8.

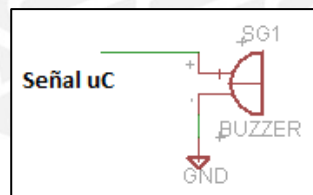


Figura 3.8. Circuito Alarma Sonora

3.2.4.2 Alarma Visual

Con una salida lógica del microcontrolador se prende un diodo LED rojo de manera sencilla como se puede observar en la figura 3.9.

$$R_6 = \frac{5V - V_F}{I_{LED}} = \frac{5V - 1.75}{10mA} \approx 330 \Omega$$

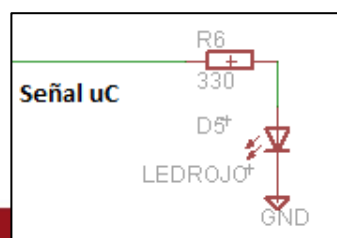


Figura 3.9. Circuito Alarma Visual

3.2.5 Pantalla

La pantalla es la interfaz entre el equipo y el operario ya que muestra la dosis equivalente de radiación. Además, le permite comprobar la operatividad del equipo leyendo los mensajes del display.

Se empleó una pantalla LCD de 2x16 como se ve en la Figura 3.10 debido a su tamaño, poco consumo de corriente y gracias a su facilidad de ser manejada por el microcontrolador, solo requiere de 6 pines como se ve en la Figura 3.11.



Figura 3.10. Pantalla LCD

Tomado de <http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-456781383-display-lcd-2x16-hd44780-backlight-azul-arduino-pic-etc- JM>

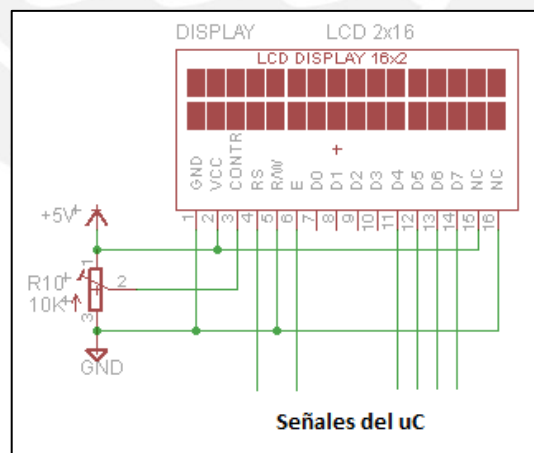


Figura 3.11. Conexión LCD Cuatro Bits

3.2.6 Microcontrolador

El equipo requiere de un elemento que permita calcular la tasa de dosis, active las alarmas una vez sobrepasado los límites y muestre los mensajes respectivos en una pantalla.

Se utilizaron 18 pines en total distribuidos de la siguiente forma:

- 8 pines de salida
 - 2 pines de alarma (sonora y visual)
 - 6 pines para pantalla LCD
- 3 pines de entrada
 - ADC
 - Pulsador
 - Señal de sincronización
- 2 pines para Cristal de 16MHz
- 5 pines para alimentación

La figura 3.12 muestra las conexiones del microcontrolador.

Se basó la elección en microcontroladores que permitan una ventaja a la portabilidad del equipo, considerando que cuenten incorporados conversores analógicos digitales, interrupciones externas y un número adecuado de puertos de entrada y salida.

Tabla 3.3. Comparación de microcontroladores de 8 bits.

Características	PIC16F873A	ATMEGA8
Arquitectura	Harvard	Harvard
Memoria Flash	8KB	8KB
Memoria SRAM	368 Bytes	1KB
Puertos E/S	22	23
Consumo de Corriente	7mA	11mA
Conversor Análogo-Digital	8 canales de 10 bits	8 canales de 10 bits
Interrupciones Externas	2	2
Frecuencia de Reloj Máxima	20MHz	16MHz

Elaboración: Propia

De acuerdo a la tabla 3.3 se escogió el **Atmega8** debido a su mayor memoria RAM y a las experiencias en trabajos previos.

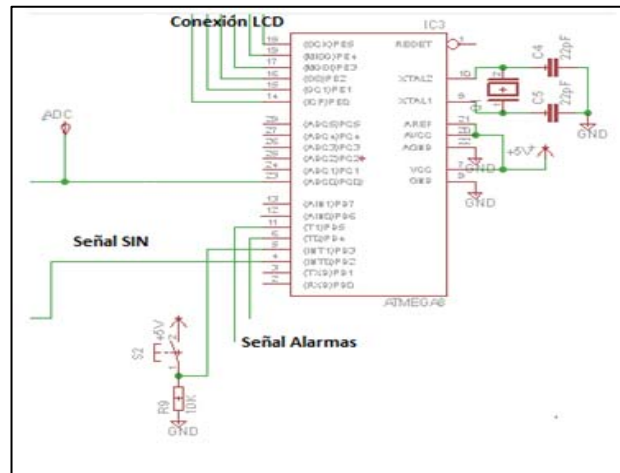


Figura 3.12. Conexión del Atmega8

3.2.6.1 Diagrama de Tiempos

Debido a que se trabaja con tiempos muy cortos, es conveniente mostrar en la Figura 3.13 todas las acciones principales del equipo en la siguiente figura previamente a detallar el algoritmo del Atmega8 para evitar confusiones.

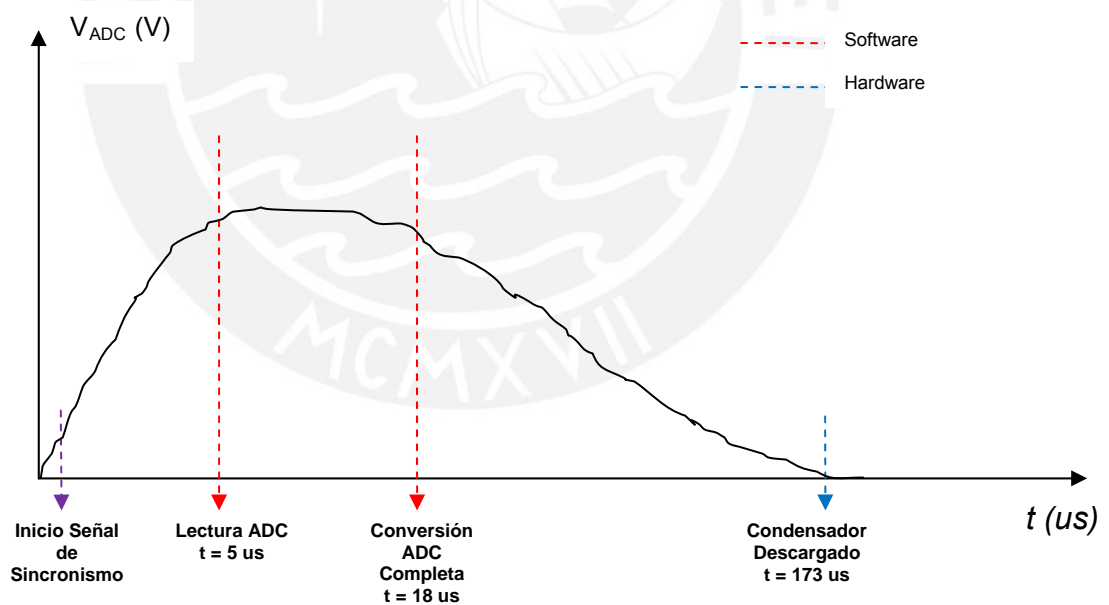


Figura 3.13 Elaboración Propia

3.2.6.2 Diagrama de Flujo Programa Principal

En la figura 3.14 se observa el funcionamiento del programa principal.

Primero se realiza la configuración

- Puertos E/S:
 - PD6=Sincronismo

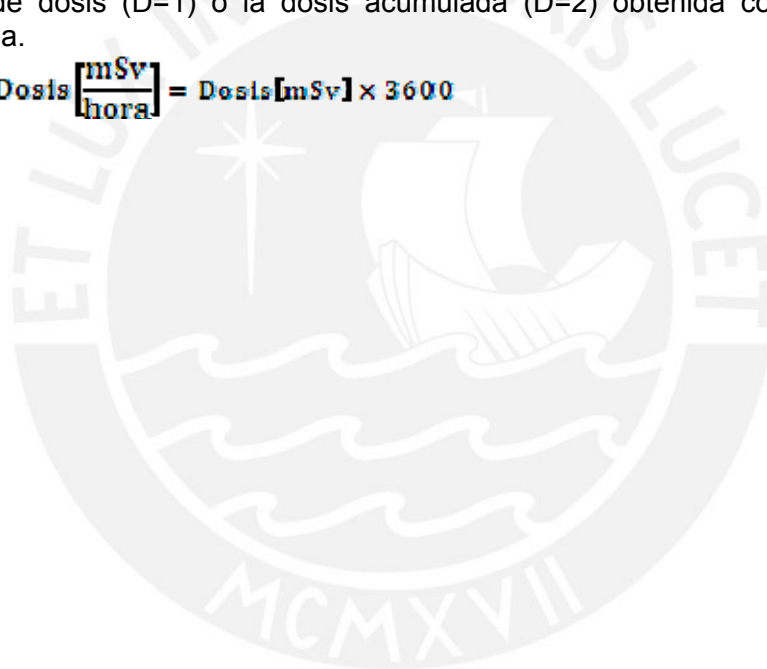
- PD2=Pulsador
- PD5=Alarma 1
- PD6=Alarma 2
- ADC de 8 bits. Canal 0 (PD0)
- Conexión LCD (PB0... PB5)
- Interrupción Externa (INT0)

Luego inicializamos los puertos, la pantalla LCD y las variables globales (B=1, D=1). Esperamos en un bucle infinito la señal del circuito de sincronismo leyendo el puerto D6 hasta tener un '1'. Una vez recibida la señal se genera un retardo de 5 us para que la señal de radiación se integre por completo y leamos ese valor por el ADC. Terminada la conversión, calculamos la tasa de dosis y la dosis

Para realizar la conversión de ADC a tasa de dosis se debe calibrar el equipo como se explicará en el siguiente capítulo, obteniendo un modelo matemático que relacione el voltaje del ADC con la tasa de dosis.

Finalmente leemos la variable D que me permite escoger si quiero mostrar la tasa de dosis (D=1) o la dosis acumulada (D=2) obtenida con la siguiente formula.

$$\text{Tasa Dosis} \left[\frac{\text{mSv}}{\text{hora}} \right] = \text{Dosis}[\text{mSv}] \times 3600$$



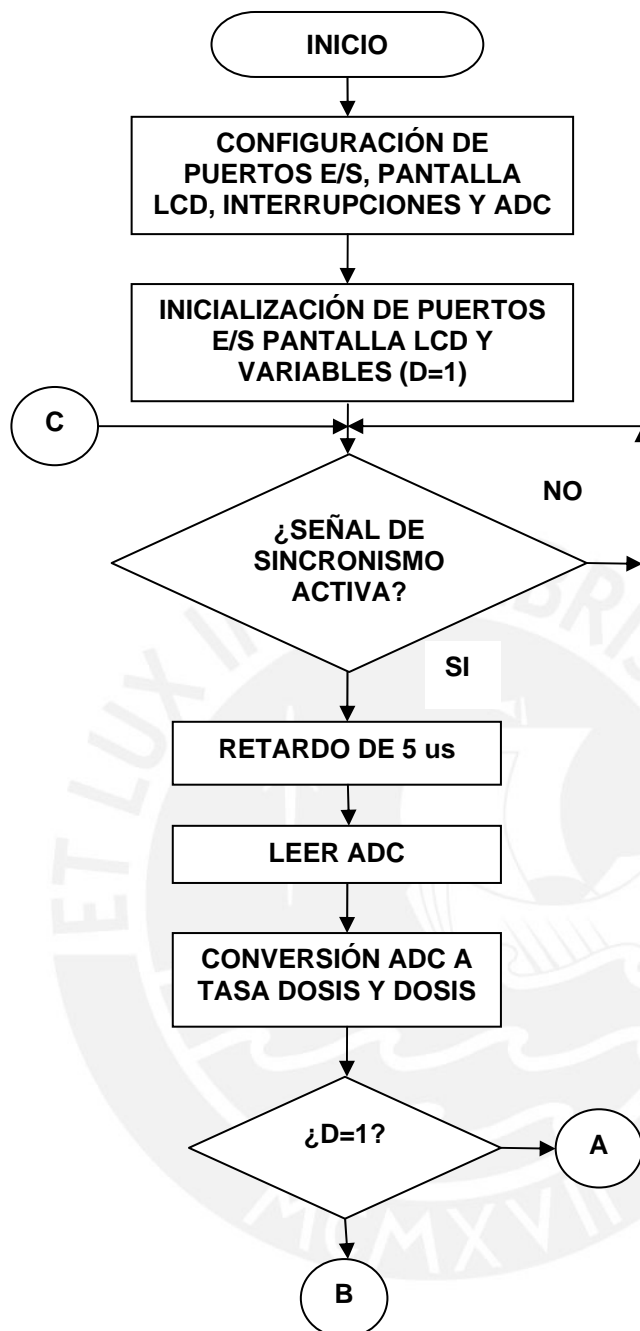


Figura 3.14. Elaboración Propia

La lógica de esta parte del programa principal, mostrado en las figuras 3.15 y 3.16 es idéntica para ambas. En caso la tasa de dosis o la dosis superen los límite de radiación se procederá a prender las alarmas activando los puertos PD4 y PD5. Después, se mostrará un mensaje mostrando la dosis/tasa elevada y un mensaje de advertencia. Caso contrario solo se mostrara las dosis/tasas. Finalmente, se regresa a la parte inicial del programa esperando otra vez la señal del circuito de sincronismo para tomar un nuevo valor de radiación. Para mayor detalle en el programa, revisar el código de prueba comentado en el ANEXO N°3.

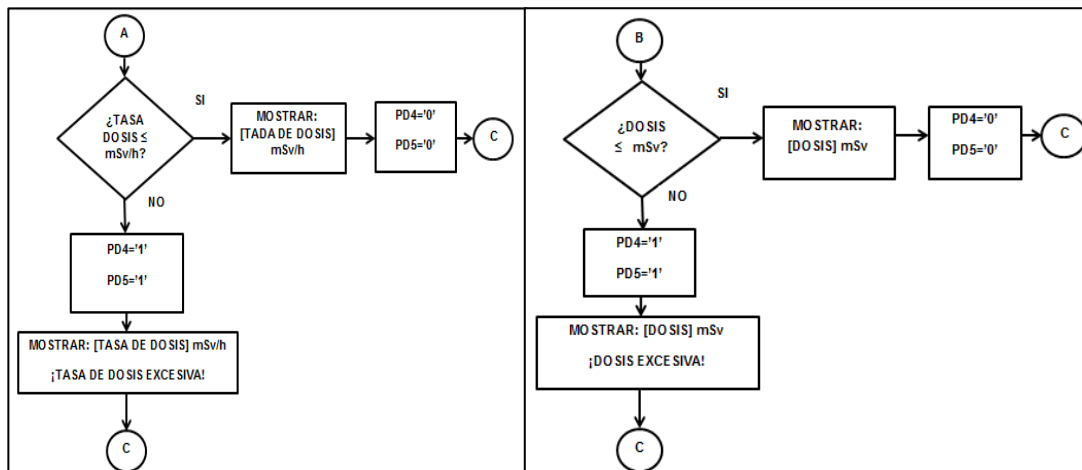


Figura 3.15 Elaboración Propia

Figura 3.16 Elaboración Propia

3.2.6.3 Diagrama de Flujo Interrupción Externa INT0

La subrutina, mostrada en la figura 3.17, le permite al usuario seleccionar que acción realizar. Al entrar en la interrupción lo primero que se realiza es generar un retardo de dos segundos y luego leer el puerto del pulsador.

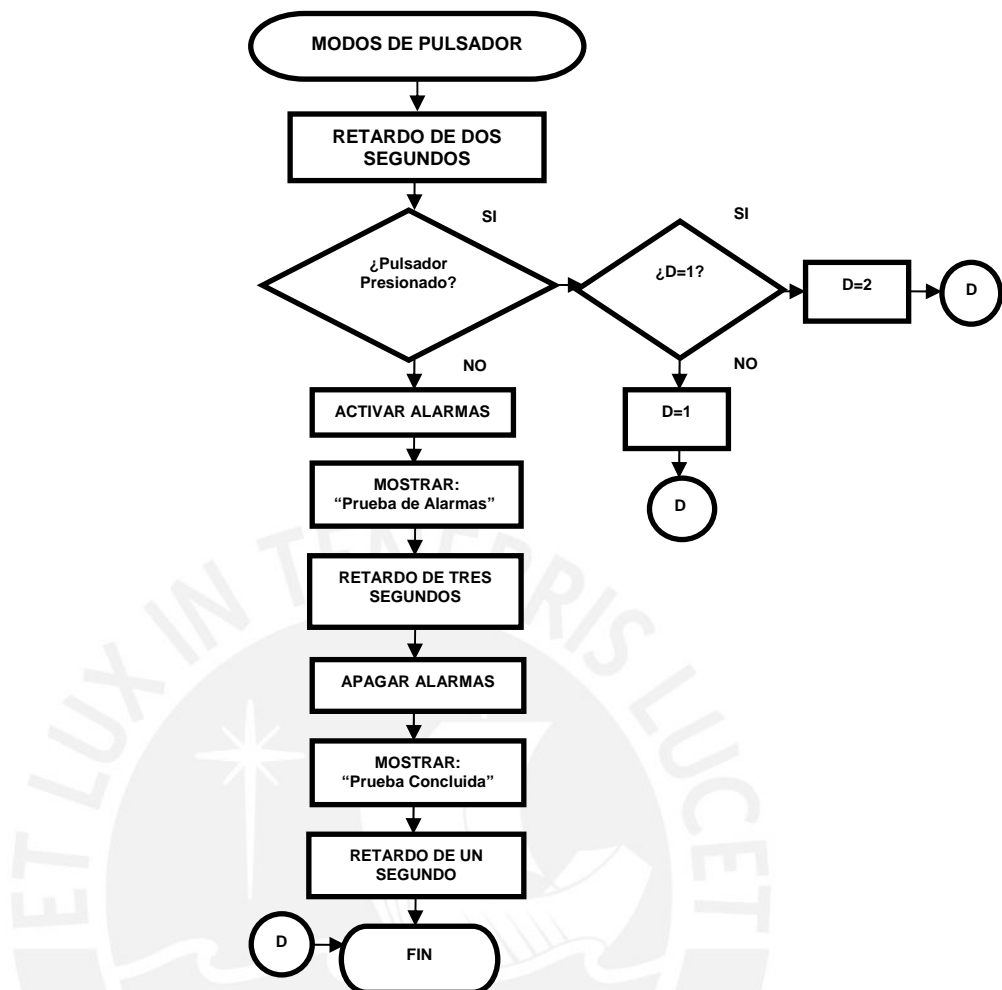
Es decir si luego de dos segundos el usuario sigue presionando el botón se realiza el cambio de tasa a dosis o viceversa. Caso contrario, entra a realizar la prueba de funcionalidad de alarmas.

Cambio Tasa/Dosis:

La subrutina sobrescribe el valor de D para que el dispositivo muestre la tasa de dosis. Si el usuario desea ver la dosis, el equipo escribirá el valor entero dos en la variable D. Caso contrario, escribirá el valor entero de uno.

Prueba de Alarmas:

Durante tres segundos las alarmas, tanto visual como sonora, se activan y se muestra el mensaje "Prueba de Alarmas" en pantalla. Pasado un segundo se apagan las alarmas y se muestra el mensaje "Prueba Concluida" en la pantalla.



Figuran 3.17. Elaboración Propia

3.2.7 Alimentación

El detector de R_x y R_y requiere de un sistema de energía que provea los voltajes necesarios para su funcionamiento. A continuación se detalla el consumo de corriente de todo el equipo en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Consumo de Corriente del Detector de R_x y R_y .

Etap	Voltaje Requerido (V)	Consumo de Corriente (mA)	Funcionamiento
Circuito de sensado	±5V, -6V	0.000001	Continuo
Circuito de sincronización	5V	0.2	Continuo
Acondicionamiento de Señal	±5V	0.1	Continuo
Microcontrolador	5V	11	Continuo
Pantalla LCD	5V	132	Continuo

Alarma Sonora	6V	5	Sólo al superar límites
Alarma Visual	5V	10	Sólo al superar límites
Indicadores de Carga	$\pm 5V$	0.137	Continuo
	TOTAL	159.437 mA	

Elaboración: Propia

Como se puede apreciar de la tabla anterior, se requieren de cuatro niveles de voltaje DC (+5V, -5V, -6V, +6V) los cuales serán suministrados desde la etapa de alimentación como muestra en el siguiente diagrama de bloques. Ver figura 3.18

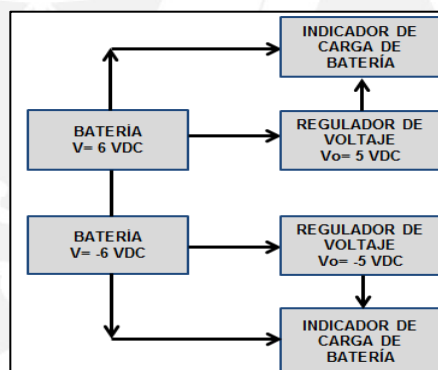


Figura 3.18. Diagrama de bloques de Etapa de Alimentación.

Batería

Siendo el detector de R_x y R_y un equipo portátil, la batería se ha seleccionado tomando en consideración la capacidad de corriente y las dimensiones de la batería en beneficio de la portabilidad del equipo. La comparación se muestra en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Comparación de baterías.

Características	ALCALINA N	LITIO 2450	LITIO 223
Fabricante	Duracell	Duracell	Duracell
Voltaje (V)	6V	3V	6V
Capacidad de corriente (mAh)	825 mAh	620 mAh	1400 mAh
Dimensiones (mm)	30x11x11	5x24x24	36x35x19

Elaboración: Propia

Finalmente, se decidió por la batería de Litio 223 ya que otorga una mayor autonomía sin perjudicar el tamaño del equipo.

$$\text{Número de Horas} = \frac{\text{Capacidad Amperimétrica}}{\text{Consumo de Corriente}}$$
$$\text{Número de Horas} = \frac{1400\text{mAh}}{159.437\text{mA}}$$
$$\text{Número de Horas} = 8.78\text{ Horas}$$

La batería dura aproximadamente ocho horas con cuarenta y cinco minutos.

Reguladores de Voltaje

Los amplificadores operacionales requieren de una alimentación dual de ±5V,

la cual se obtiene de conectar las baterías a un regulador de voltaje fijo cada una. En la tabla 3.6 se puede apreciar las comparaciones entre tres reguladores lineales positivos disponibles en el mercado local.

Tabla 3.6. Comparación de Reguladores Positivos.

Características	L7805	L4941BV	LM2937
Corriente de Salida Máxima	1 A	1 A	500 mA
Voltaje de caída típico	2 V	0.450 V	0.5 V
Corriente de Reposo Máxima	6mA	8mA	10mA
Rango de Temperatura	-40 a 125 °C	-40 a 150 °C	-65 a 150 °C

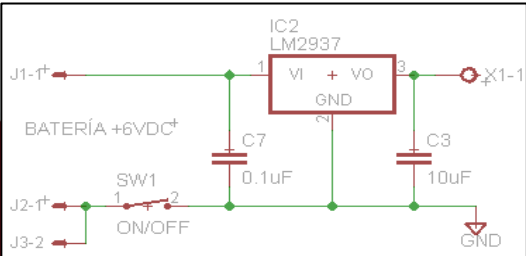
Elaboración Propia

El regulador común L7805 es descartado debido a su pobre eficiencia para sistemas portátiles debido a alto voltaje de caída. En cambio, los otros dos reguladores permiten aprovechar de forma óptima energía de las baterías, favoreciendo a la duración de uso del detector. El regulador elegido es el

LM2937,

maneja la

debido a que
cantidad suficiente



de corriente de salida para el consumo máximo del equipo. En la figura 3.19 se muestra el circuito del regulador.

Figura 3.19. Regulador Lineal de 5V

Idénticamente, se escoge el regulador **LM2990T** por su alta eficiencia de acuerdo a la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Comparación de Reguladores Negativos

Características	LT11175	LM2990T	LM7905
Corriente de Salida Máxima	500 mA	1 A	1.5 A
Voltaje de caída típico	0.5 V	0.6 V	1.1V
Corriente de Reposo Máxima	45 uA	1 mA	1mA
Rango de Temperatura	-40 a 125 °C	-40 a 125 °C	-40 a 125 °C

Elaboración Propia

De la misma forma se observa su circuito en la figura 3.20

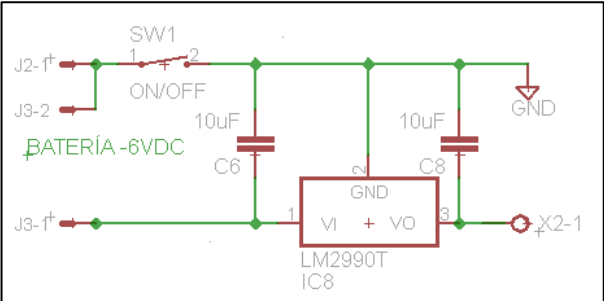


Figura 3.20. Regulador Lineal de -5 V

Indicadores de Carga de Batería

Estos circuitos le indican al operario el nivel de carga de sus baterías a través de un indicador visual. Cuando alguno de los LED color verde se encienda, indicará que el voltaje en la batería ha disminuido acercándose al límite de funcionamiento, momento recomendable para cambiar la batería.

El funcionamiento para ambos circuitos es similar, lo único que varía son los voltajes con los que se opera, el circuito funciona comparando (a través de un amplificador operacional) el voltaje de salida del regulador con un voltaje de referencia obtenido de la batería como se observa en figura 3.21. Cuando la tensión de la batería cae por debajo del límite permitido, el comparador prende el diodo LED.

$$V_{IN+} = 5V \times (50\%) = 2.5V$$

$$V_{LIMITE} \times \frac{R_{16}}{R_{15} + R_{16}} = 2.5V \rightarrow 5.5V \times \frac{R_{16}}{R_{15} + R_{16}} = 2.5V$$

$$1.2 = \frac{R_{16}}{R_{15}} \rightarrow R_{14} = 120K, \quad R_{16} = 100K$$

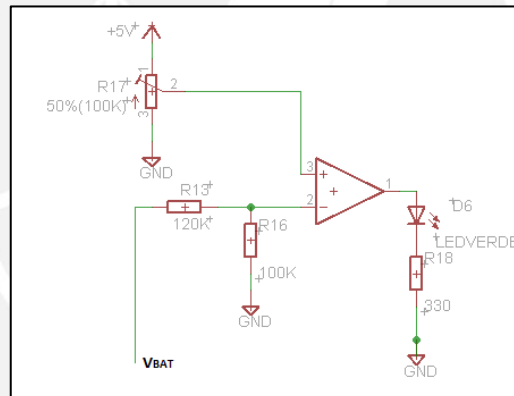


Figura 3.21. Circuito Indicador de Carga de Batería Positiva

De forma idéntica funciona el otro indicador (como se observa en la figura 3.22). Se toma de referencia el voltaje fijado negativo y se compara con la batería negativa. Si esta cae por debajo del límite establecido, se prende otro LED verde.

$$V_{IN-} = -5V \times (50\%) = -2.5V$$

$$V_{LIMITE} \times \frac{R_{19}}{R_8 + R_{16}} = 2.5V \rightarrow -5.5V \times \frac{R_{19}}{R_8 + R_{16}} = -2.5V$$

$$1.2 = \frac{R_{19}}{R_8} \rightarrow R_{19} = 100K, \quad R_8 = 120K$$

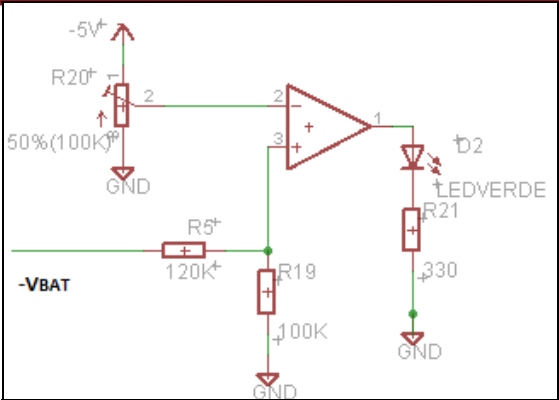


Figura 3.22. Circuito Indicador de Carga de Batería Negativa



3.3 Diagrama Esquemático

Se puede ver el circuito completo del equipo en la siguiente figura 3.23.

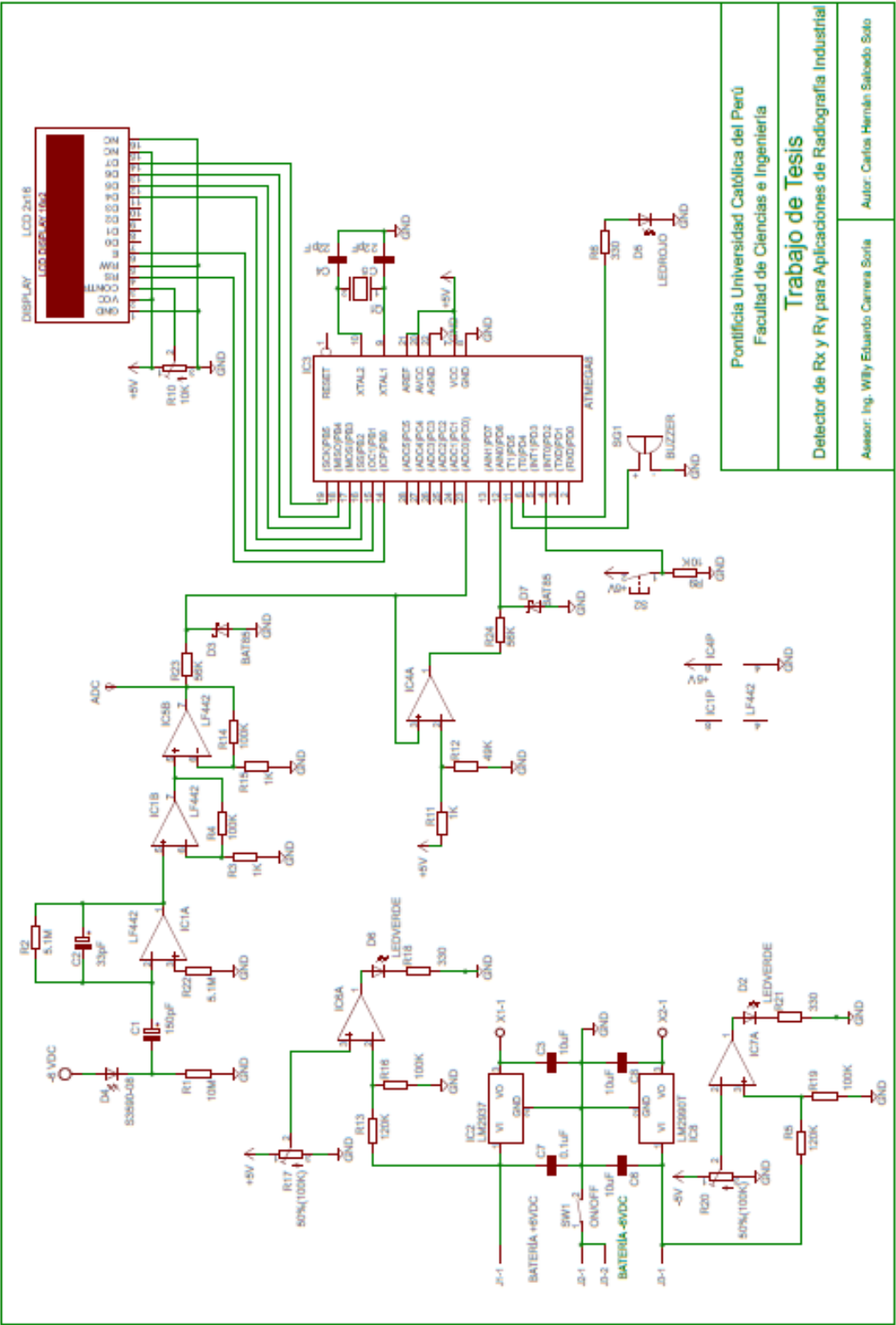


Figura 3.23. Diagrama Esquemático Completo

3.4 Costos

El costo del equipo se observa en tabla 3.8

Tabla 3.8. Presupuesto del equipo

Ítem	Componente	Cantidad	Costo Unitario(\$)	Costo Total (\$)
1	Sensor S3590-08	1	300.00*	300.00
2	Amplificador LF442	2	2.30	2.60
3	Pantalla LCD 1602D01	1	5.00	5.00
5	Bocina BUZZER	1	1.00	1.00
6	Microcontrolador Atmega8	1	3.00	3.00
7	Batería	2	4.00	8.00
8	Regulador L4941BV	1	8.60	8.60
9	Regulador LM2990T	1	3.23	3.23
10	Componentes Electrónicos Varios	--	3.00	3
11	Carcasa	1	30	30
TOTAL				\$ 364.34

Elaboración Propia

*Incluido impuestos de importación.

CAPITULO 4

SIMULACIONES Y PROTOCOLOS DE PRUEBA

4.1 Simulación del circuito de sensado en PSpice

Utilizando el software de simulación de circuitos electrónicos PSpice se ha podido respaldar el diseño correspondiente a la etapa de sensado (ver figura 4.2). Si bien el software posee limitaciones en los modelos de los OPAMP, se pueden observar las gráficas del pulso de corriente, voltaje a la entrada y salida del integrador. Además, para obtener más solidez en la simulación se ha utilizado el circuito equivalente del S3590-08 como se muestra en la Figura 4.1.

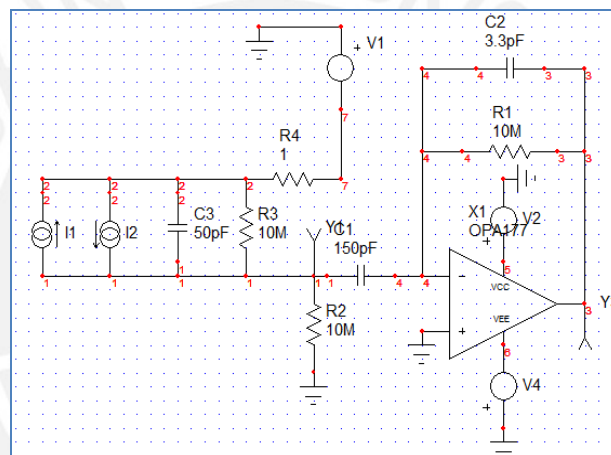


Figura 4.1 Circuito de sensado

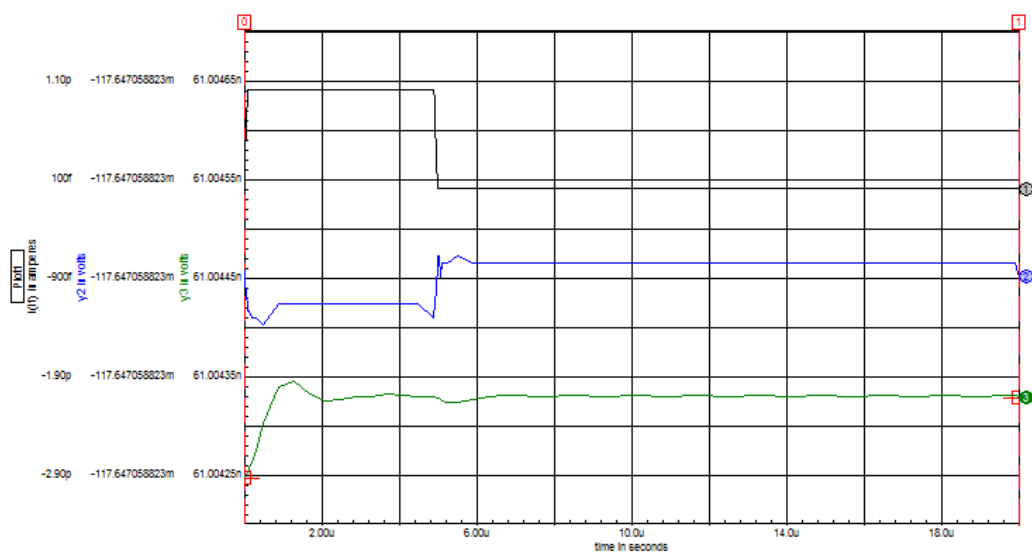


Figura 4.2 Simulación de circuito integrador

4.2 Simulación del software del Atmega8 en Proteus 8 Professional

El algoritmo elaborado en el Atmega8 se ha simulado utilizando el Proteus 8 Professional gracias a su flexibilidad de manejar código en lenguaje C.

A continuación se muestra el funcionamiento del programa principal utilizando un potenciómetro directo al ADC del Atmega8, dos diodos animados emulando ambas alarmas -junto a un osciloscopio para ver estas señales- y la pantalla LCD mostrando los mensajes de tasa de dosis como se aprecia en las Figuras 4.3 y 4.4. Para efectos de la simulación se consideró 3 mSv/hora.

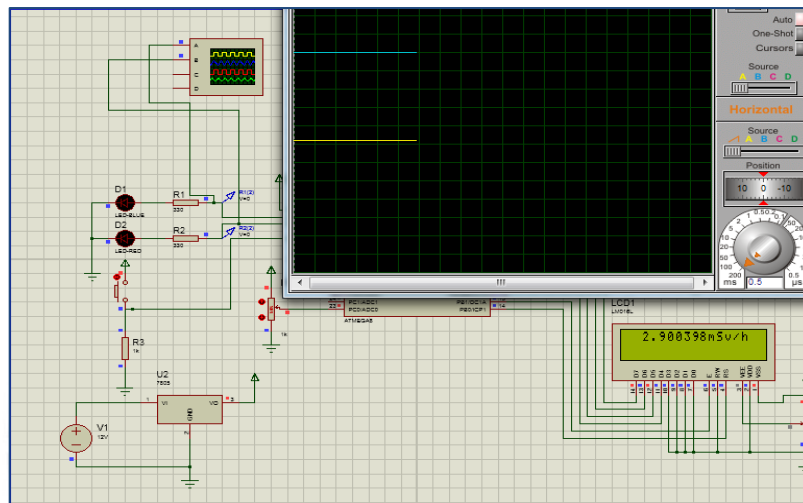


Figura 4.3 Simulación del software equipo

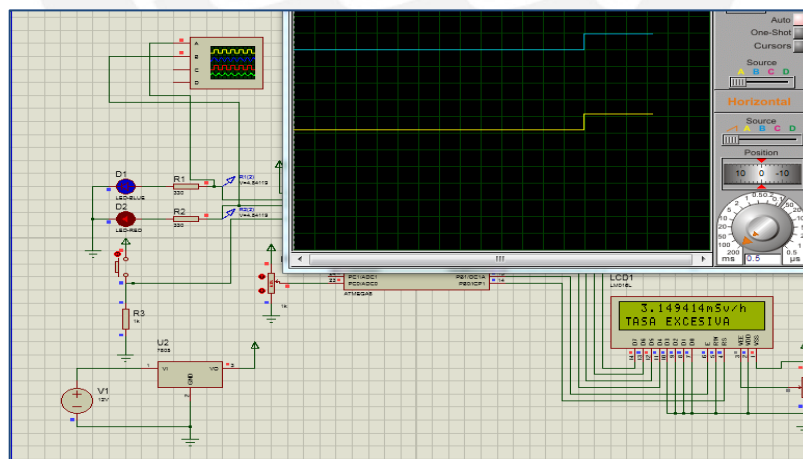


Figura 4.4 Simulación de tasa excesiva

4.2.2 Simulación de INT0

La interrupción externa INT0 del Atmega8 es activada por un botón del equipo que le permite al usuario realizar dos acciones diferentes dependiendo del tiempo que lo presione.

4.2.2.1 Cambio de Dosis

Se muestra en la Figura 4.5 como luego de presionar el pulsador por más de dos segundos, la pantalla muestra la dosis expresada en mSv.

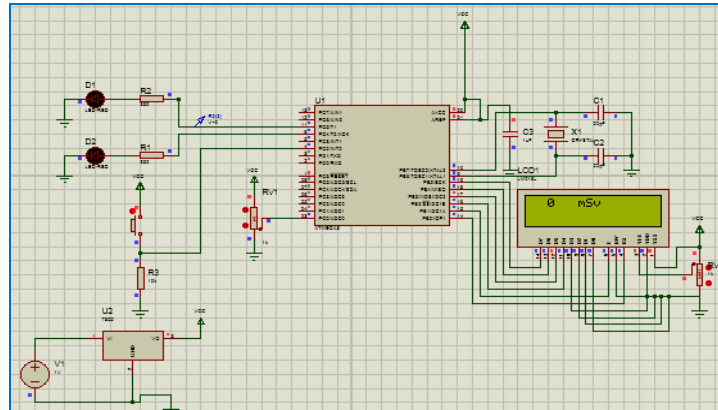


Figura 4.5. Dosis de Radiación

4.2.2.2 Prueba de Alarmas

Se muestran en las Figuras 4.6 y 4.7. como se activan las alarmas y se muestran los mensajes en pantalla LCD.

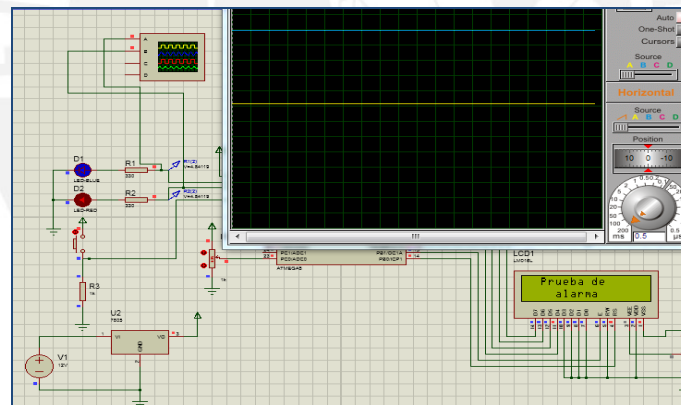


Figura 4.6. Inicio de la prueba

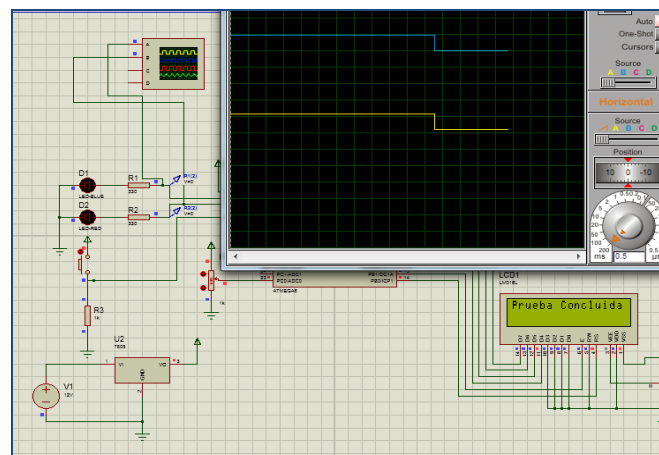


Figura 4.7. Conclusión de la prueba

4.3 PROTOCOLOS DE PRUEBA

Propósito

Debido a los efectos dañinos de la radiación para el ser humano descritos en el segundo capítulo, las pruebas correspondientes al diseño del detector de rayos X y rayos gamma frente a la radiación no pueden realizarse de manera convencional como cualquier otro circuito.

Por esta razón, los protocolos de prueba establecen una serie de procedimientos y parámetros a seguir para poder realizar pruebas a circuitos electrónicos implementados en presencia de radiación X y gamma, considerando las normas de seguridad radiológica y los procedimientos de operaciones radiográficas [19].

Alcance

Se aplicará para el circuito electrónico diseñado en este asunto de estudio; sin embargo, el protocolo también puede emplearse con cualquier circuito en presencia del equipo generador de Rayos X del Laboratorio de Materiales de la PUCP.

Área de Pruebas

- El área colindante al equipo de rayos X está rodeada de paredes de concreto como se aprecia en la figura 4.8



Figura 4.8. Equipo de rayos X en el Laboratorio de Materiales

- La zona debe estar demarcada con letreros de precaución como los de la figura 4.9.



Figura 4.9. Letreros de Zona Radioactiva

- El área debe ser evacuada de personas ajenas a los ensayos como se ve en la figura 4.10.



Figura 4.10. Zonas despejadas de público

Equipos de Rayos X del Laboratorio de Materiales

- Fabricante: Balteau NDT
- Modelo: GDF165. Ver figura 4.12
- Rango de Alto Voltaje: 50-160 KV
- Rango de Corriente en el tubo: 0.1-5 mA
- Ángulo del Rayo: 55°.
- Se utilizaran colimadores para reducir la radiación
- La llave de contacto estará bajo el control del operario autorizado.

- El equipo incluye una unidad de control para su operación a distancia desde una estación de trabajo. Ver figuras 4.11 y 4.13.



Figura 4.11. Estación de trabajo Figura 4.12. Tubo de rayos X



Figura 4.13. Tubo, unidad de control, cables y control remoto

Implementos

- Circuito electrónico a prueba
- Detector de Radiación de referencia (RAD-60)
- Osciloscopio
- Multímetro (Opcional)
- Cámara de Video

Actividades Previas al Ensayo

1. Equipos de protección personal mínimos:

- Detector de rayos X
- Chalecos Reflectores
- Botas con punta de acero
- Casco
- Lentes
- Guantes

2. El equipo generador de rayos X debe contar con:
 - Cables de conexión eléctrica
 - Foco indicador de funcionamiento
 - Colimador
 - Llave de Contacto
3. Instalación y colocación de los circuitos de prueba y las cámaras de video.
4. Evacuación de cualquier persona ajena al ensayo.
5. Calentamiento del generador a 150KV durante 3 minutos al empezar la jornada de trabajo.
6. Selección del tiempo de exposición y los KV a utilizarse en la exposición.
7. Toma de la distancia apropiada teniendo una lectura de **7.5 uSv/hora** antes del arranque del equipo de rayos X.

Una vez concluidas las actividades previas, se procederá a la etapa de pruebas donde se realizarán las evaluaciones necesarias a los circuitos electrónicos.

Etapa de Pruebas: Equipo detector de rayos X/Gamma

Las pruebas del equipo detector son cuatro en total. Las dos primeras, sin presencia de radiación, que permiten corroborar el funcionamiento del equipo antes de pasar a probar el circuito electrónico con los rayos X. Las pruebas son las siguientes:

- Prueba del sensor
- Prueba de microcontrolador
- Prueba del circuito de sensado
- Prueba de calibración del equipo

Antes de probar el circuito electrónico frente a la radiación, deben hacerse las dos primeras pruebas que corroboren el funcionamiento del equipo.

1. Prueba del sensor

Esta prueba permite verificar el funcionamiento del sensor S3590-08 y del circuito de detección de forma preliminar. Para llevar a cabo estas verificaciones, se probará el sensor aprovechando su capacidad de detectar ondas de la parte visible del espectro electromagnético (400~800 nm).

- Se irradiará el diodo PIN S3590-08 con luz roja de un diodo LED HLMP-C100 implementando el circuito la figura 4.14.

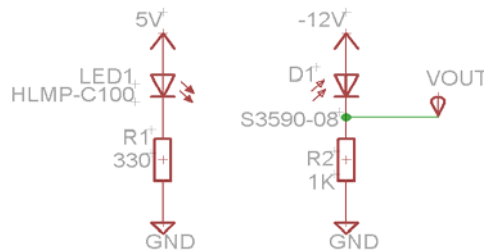


Figura 4.14. Circuito de prueba de sensor

- Con los datos de las hojas técnicas se obtiene el $V_{OUT} = 2.7V$ **(Ver Anexo 2 para revisar los cálculos)**
- Una vez obtenido el voltaje de salida se recomienda utilizar un integrador para revisar que tan bien sigue el circuito mencionado las señales de luz

2. Prueba del microcontrolador

Esta prueba permite comprobar el funcionamiento del código del microcontrolador con el circuito mostrado en la figura 4.15.

- Colocar un potenciómetro a la entrada del ADC para emular los voltajes variables generados por la radiación.
- Variar el potenciómetro y apreciar el cambio de la dosis en la pantalla LCD.
- Activar el pulsador en ambas formas descritas en el capítulo 3 para realizar la prueba de alarmas y el cambio de lectura.

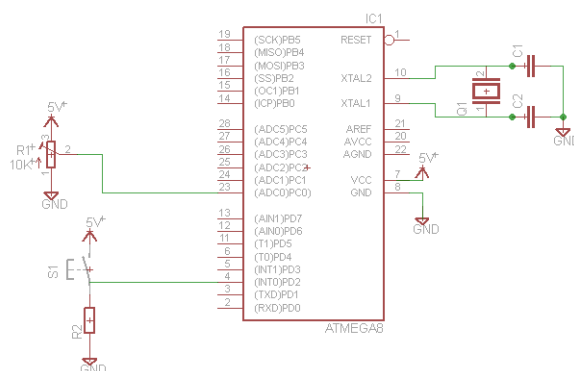


Figura 4.15. Potenciómetro emulando V_{ADC} producido por la radiación

La prueba concluirá con éxito cuando se aprecie en la implementación el cambio de los valores en la pantalla LCD al mover el potenciómetro, la activación de las alarmas una vez se supere el V_{ADC} umbral y la entrada a ambos modos de funcionamiento del pulsador.

3. Prueba del circuito de detección

Esta prueba tiene la finalidad de calibrar el equipo relacionando la dosis del instrumento patrón con los voltajes obtenidos del circuito de detección utilizando el circuito de la figura 4.16.

Puntos de Prueba

Utilizando un canal del osciloscopio se apreciará una curva similar a la obtenida en las simulaciones en el punto ADC.

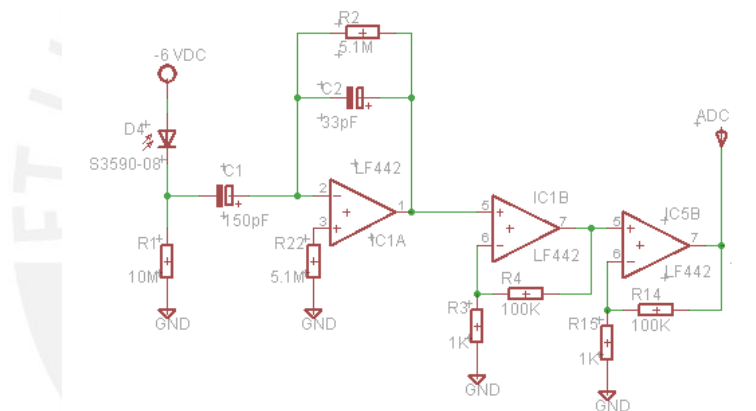


Figura 4.16. Circuito de sensado y acondicionamiento de la señal

La distancia que se tomaría en los ensayos evita una observación directa de la lectura de la dosis, por lo que se realizarán grabaciones en video.

Para eso se seguirán los siguientes lineamientos extras:

- El área activa del sensor estará cubierta de aluminio para evitar el sensado del espectro visible.
- Las pruebas se realizarán estando a quince metros de distancia de la fuente (alejamiento típico durante los ensayos de radiografía industrial).
- Solo una vez concluido el tiempo de exposición se procederá a revisar las grabaciones.

Las grabaciones deben tomar claramente la lectura del instrumento patrón y las curvas obtenidas de los puntos de prueba del circuito.

Después se analizará el comportamiento del circuito en diferentes escenarios variando los KV del tubo de rayos X.

Finalmente, se elaborará un modelo matemático incluido en el microcontrolador Atmega8 que relacione los datos en voltios con la tasa dosis en mSv/h.

4. Prueba del equipo de detección

Esta es la última prueba a realizarse, evalúa todo el equipo en sí (Ver ANEXO N°3) para ver el diagrama esquemático completo) tanto hardware como software y tiene como objetivos:

- Verificación de lectura adecuada de dosis
- Verificación de las activaciones de alarma
- Funcionamiento integral del equipo
- Obtención de exactitud, precisión y error del equipo

Igual que en la prueba anterior solo se revisarán las grabaciones al término del tiempo de exposición. Las cámaras deberán grabar ambas lecturas de dosis, la del instrumento implementado y el instrumento patrón.

Se realizarán las pruebas extras que se necesiten, con diferentes cantidades de KV en el tubo de rayos X, para analizar los resultados de las lecturas de ambos y obtener el cuarto objetivo.

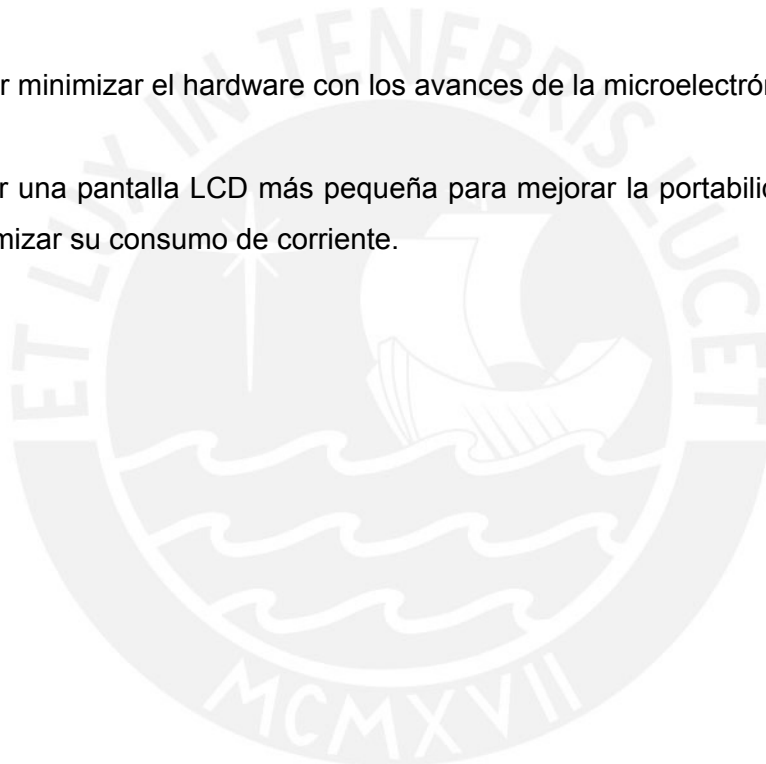
La prueba tendrá éxito cuando se observen lecturas similares en ambos equipos, cumpliendo así el funcionamiento completo del equipo detector de rayos X y rayos gamma.

CONCLUSIONES

- Se demostró que el sensor de radiación S3590-08 otorga una señal débil de corriente proporcional a la intensidad de la radiación como requiere el equipo.
- Se acondicionó la señal del sensor hasta 5 VDC para que el ADC del Atmega8 pueda leerla sin inconveniente.
- Se elaboró un algoritmo en el Atmega8 que muestra la radiación en una pantalla LCD una vez llegada la señal de radiación.
- Se atenuó el ruido electrónico lo más posible debido a los diminutos valores de corriente del diodo PIN.
- Se empleó un buzzer piezoeléctrico como alarma sonora con una intensidad de 76dB.
- Se empleó un diodo LED como indicador visual.
- Se demostró que el equipo puede realizar una comprobación de funcionamiento de alarmas según indica la normativa utilizando un algoritmo de interrupción externa en el Atmega8.
- Se desarrolló una etapa de alimentación de $\pm 5\text{VDC}$ a partir de un par de baterías de 6 VDC sin afectar la portabilidad del equipo.
- Estamos en condiciones de diseñar e implementar en un futuro un equipo de esta naturaleza en el país a un precio accesible.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Realizar pruebas con el sensor seleccionado en el Laboratorio de Materiales para poder asegurar los verdaderos valores de voltaje en el ADC.
- Buscar una mejora en la etapa de alimentación para mejorar la autonomía del equipo
- Diseñar una conexión USB 2.0 y una interfaz gráfica para que el usuario cambie los límites de dosis a su voluntad desde una PC
- Buscar minimizar el hardware con los avances de la microelectrónica
- Utilizar una pantalla LCD más pequeña para mejorar la portabilidad del equipo y optimizar su consumo de corriente.



FUENTES

- [1] “X-ray can now inspect large aircraft-engine parts”
Machine Design. November 23 1989.
- [2] ITTIMANI, Mana; GOOZÉE, Gary; MANOVEL, Alvaro; HOLDGATE, Anna
2007 “Trauma team radiation exposure: The potential need for dosimetry
monitoring” Emergency medicine Australasia: EMA. Vol.19 (6), pp.494-500
- [3] SE International, Inc. Consultado: 22/09/2012.
http://www.seintl.com/products/pen_dosimeters.html
- [4] SE International, Inc. Consultado: 22/09/2012.
http://www.seintl.com/products/mc1k_II.html
- [5] HERNON, Christina; BOYER, Edward W;CHRISTENSEN, Doran; SUGARMAN,
Steve
2006 “Case Files of the University of Massachusetts Fellowship in Medical
Toxicology: Three Patients with an Industrial Radiography Source
Exposure”. Journal of medical toxicology: official journal of the American
College of Medical Toxicology.Vol.2 (4), pp.163-168
- [6] United States Nuclear Regulatory Commission. Consultado: 24/09/2012
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part034/part034-0033.html>
- [7] ND Products, Inc. Consultado: 24/09/2012
<http://www.ndtmart.com/dosimeters-alarms/personal-rate-alarm-audible-range-alarms-p-266.html>
- [8] ND Products, Inc. Consultado: 24/09/2012
<http://www.ndtmart.com/dosimeters-alarms/personal-rate-alarm-with-earphone-led-p-273.html>
- [9] KIM, Ki Jae ; KIM, YeonHwa ; SONG, Jun Ho ; JO, Yong Nam ; KIM, Jeom-Soo
; KIM, Young-Jun

- 2010 "Effect of gamma ray irradiation on thermal and electrochemical properties of polyethylene separator for Li ion batteries". Journal of Power Sources.Vol.195 (18), pp.6075-6080
- [10] CHU, Libing; WANG, Jianlong; WANG, Bo
- 2011 "Effect of gamma irradiation on activities and physicochemical characteristics of sewage sludge". Biochemical Engineering Journal.Vol54 (1), pp.34-39.
- [11] SE International, Inc. Consultado 22/09/2012
http://www.seintl.com/products/rad_60.html
- [12] SE International, Inc. Consultado 22/09/2012
<http://www.seintl.com/products/sentry.html>
- [13] KNOLL, Glenn.
1979 Radiation detection and measurement
New York, USA.
- [14] AboutMetals. Consultado: 03/10/2012
<http://metals.about.com/library/bldef-Radiography.htm>
- [15] AboutMetals. Consultado: 03/10/2012
<http://metals.about.com/library/bldef-Welding.htm>
- [16] Radiation Basics: SE International, Inc. Consultado: 23/09/2012
http://www.seintl.com/support/radiation_info.html
- [17] SHAPIRO, Jacob
1981 Radiation Protection: A Guide for Scientists and Physicians.
2da Edición. Cambridge, Massachutes.
- [18] Instituto Peruano de Energía Nuclear
2009 "Requisitos de Seguridad Radiológica en Radiografía Industrial"
- [19] Pontificia Universidad Católica del Perú
2008 "Procedimiento de Operaciones Radiográficas"

- [20] KAMIMURA, Hiroshi ; IZUMI, Shigeru ; KITAGUCHI, Hiroshi ; YAMAGOSHI, Atsushi ; SATOH, Katsutoshi ; SADAOKA , Noriyuki ; TAKAGI, Tarou ; KUWABARA, Kouji ; NUMATA, Shouhei.
2005 "X-ray sensor signal processor and X-ray computed tomography system using the same"
- [21] Hamamatsu Photonics. Consultado: 11/05/2013
http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s3590-08_etc_kpin1052e09.pdf
- [22] Detection Technology, Inc.
2013 "Detection of X-ray and Gamma-ray Photons Using Silicon Diodes"
- [23] Mouser Electronics. Consultado 17/07/2012
<http://www.mouser.com/cauzzztalog/specsheets/KT-400142.pdf>

